

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Aplikovaná geologie



Bc. Anna Sommerová

Srážení solí v přípovrchové zóně pískovce a dalších porézních hornin a simulace transportu a výparu vody

Salt precipitation in subsurface zone of sandstone and other porous rocks and simulation of water transport and evaporation

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D.

Praha, 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 18. 8. 2017

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat svému školiteli doc. RNDr. Jiřímu Bruthansovi, Ph.D. za poskytované konzultace a cenné rady během psaní diplomové práce. Tento výzkum byl podpořen Grantovou agenturou ČR (16-19459S).

Abstrakt

Hlavním cílem této práce bylo zjištění a srovnání iontů tvořících soli ze vzorků odebraných v přípovrchové zóně pískovce a dalších porézních hornin. Studované vzorky pocházely z odlišných prostředí (humidní a aridní klima) z různých lokalit v České republice a ve světě. Identifikaci jednotlivých solí jsem provedla na základě vyhodnocení chemických analýz loužených vzorků. Dále jsem pomocí barviva fluoresceinu sledovala kapilární vztlínání a výpar v nenasycených vzorcích pískovce.

Obsahy solí na lokalitách v České republice v prostředí humidního klimatu jsou obecně nižší než na zahraničních lokalitách v prostředí aridního klimatu. Minerál halit dominuje na lokalitě Petra a Crystal Peak, na ostatních lokalitách převládají minerály tvořené sírany. Na lokalitách v Českém ráji a okolí se jako na jediné ze studovaných lokalit vyskytují soli s obsahem hliníku – alumy. Relativně vysoké koncentrace dusičnanového minerálu nitronatritu jsem stanovila na lokalitě Čertova kazatelna v Plzni. Na základě pozorování kapilárního vztlínání při pokusech s uměle vytvořenými voštinami, jsem dospěla k závěru, že počáteční kapilární výška je rozhodující pro transport roztoku a že při určité kapilární výšce se roztok dostává pouze do důlku voštiny, zatímco vystouplé části skály zůstávají suché.

Summary

The main goal of this thesis was to find and compare salt-forming ions from samples of a subsurface zone of sandstone and other porous rocks. The surveyed samples came from different environments (humid and arid climate) from different locations in the Czech Republic, Jordan and the United States of America. Identification of various types of salt was based on evaluation of chemical analyzes of leached samples. Furthermore a laboratory experiment in which I used a fluorescein dye to observe the capillary rise and evaporation in unsaturated samples of sandstone was carried out.

The salt content in the Czech Republic humid environment locations is generally lower than the one in foreign arid climate locations. Halit dominates in the locations Petra and Crystal Peak. In the other locations sulphate minerals dominate. The salts containing aluminum – alums were determined in the Czech Republic in the area of Czech Paradise and the surrounding. Relatively high concentrations of nitrate mineral nitratine were identified in the Devil's Pulpit location in Pilsen, the Czech Republic. From the observation of capillary rising experiments performed with artificially created honeycombs, I conclude that the height of the capillary rise is crucial for the transport of solution, and at a certain capillary height, the solution gets only into the backwalls of the honeycomb while the lips of honeycomb remain dry.

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Solné zvětrávání	5
2.1.	Vliv složení solného roztoku na intenzitu zvětrávání	5
2.2.	Přehled účinků nejběžněji se vyskytujících solí	6
2.3.	Projevy solného zvětrání	7
3.	Studované lokality	10
3.1.	Lokality v Českém ráji, Česká republika.....	10
3.1.1.	Lokalita Mladějov 1.....	11
3.1.2.	Lokalita Mladějov 2.....	12
3.1.3.	Lokalita Malobratřice	12
3.1.4.	Lokalita Radvánovice	12
3.1.5.	Lokalita Drábovna	12
3.2.	Lokality na Dvořákově stezce, Česká republika.....	13
3.3.	Lokalita Čertova kazatelna, Česká republika	15
3.4.	Lokalita Petra, Jordánsko	17
3.5.	Lokalita Crystal Peak, Utah, USA.....	19
3.6.	Lokalita Helper, Utah, USA	20
3.7.	Lokalita Jestřebice, Česká republika	22
4.	Metodika práce	23
4.1.	Metodika loužení solí	23
4.1.1.	Metodika loužení solí – práce v laboratoři	23
4.2.	Metodika loužení solí – postup zpracování výsledků chemických analýz	24
4.3.	Metodika fyzikálního modelování transportu roztoku a výparových zón	25
5.	Výsledky loužení solí	27
5.1.	Přehled výsledků loužení solí	27
5.1.1.	Lokality v Českém ráji, Česká republika	27
5.1.2.	Lokality na Dvořákově stezce, Česká republika.....	34
5.1.3.	Lokalita Čertova kazatelna, Česká republika.....	40
5.1.4.	Lokalita Petra, Jordánsko.....	46
5.1.5.	Lokalita Crystal Peak, Utah, USA	53
5.1.6.	Lokalita Helper, Utah, USA	60
5.2.	Diskuze výsledků loužení solí	64
6.	Výsledky a diskuze fyzikálního modelování transportu roztoku.....	70
6.1.	Jádro 3/28	70
6.2.	Jádro 3/54	71
6.3.	Jádro 3/6	72
7.	Závěr	75
8.	Použitá literatura	77
9.	Příloha 1. Seznam všech loužených vzorků na lokalitě Čertova kazatelna	a
10.	Příloha 2. Výsledky chemických analýz na studovaných lokalitách	d

Seznam obrázků

Obrázek 3.1: Mapa lokalit v Českém ráji a okolí.....	11
Obrázek 3.2: Voštiny na lokalitě Drábovna.	13
Obrázek 3.3: Mapa lokalit 1 a 2 na Dvořákově stezce.....	13
Obrázek 3.4: Tafoni na Dvořákově stezce.	14
Obrázek 3.5: Mapa lokality Čertova kazatelna.	15
Obrázek 3.6: Studovaný převis na lokalitě Čertova kazatelna.	16
Obrázek 3.7: Mapa lokality Petra.....	17
Obrázek 3.8: Hrobka Ad-Deir.....	19
Obrázek 3.9: Lokalita Crystal Peak.	20
Obrázek 3.10: Lokalita Helper.	21
Obrázek 3.11: Mapa lokalit Crystal Peak a Helper.	21
Obrázek 3.12: Mapa lokality Jestřebice.	22
Obrázek 4.1: Závěsná aparatura pro modelování transportu roztoku.	26
Obrázek 5.1: Četnosti obsahu solí na lokalitách Českém ráji a okolí.	30
Obrázek 5.2: Četnosti obsahu solí na lokalitách na Dvořákově stezce.	36
Obrázek 5.3: Naměřené hodnoty rovnovážné relativní vlhkosti na Dvořákově stezce ze dne 23. 9. 2015.....	39
Obrázek 5.4: Schématický náčrtek řezu převisem s lokalizací vzorků P1 – P5	41
Obrázek 5.5: Obsah solí v průběhu studovaného období na lokalitě Čertova kazatelna.	42
Obrázek 5.6: Naměřené hodnoty rovnovážné relativní vlhkosti na lokalitě Čertova kazatelna ze dne 28. 10. 2013.....	45
Obrázek 5.7: Četnosti obsahu solí na lokalitě Petra.....	48
Obrázek 5.8: Naměřené hodnoty rovnovážné relativní vlhkosti na lokalitě Petra z období, kdy probíhal odběr vzorků (21. 6. 2014 – 30. 6. 2014).	53
Obrázek 5.9: Četnosti obsahu solí na lokalitě Crystal Peak.....	55
Obrázek 5.10: Četnosti obsahu solí na lokalitě Helper.	61
Obrázek 5.11: Porovnání průměrných hodnot, mediánu a modusu obsahu solí na studovaných lokalitách.	65
Obrázek 5.12: Průměrné koncentrace hlavních kationtů na studovaných lokalitách.	66
Obrázek 5.13: Průměrné koncentrace hlavních aniontů na studovaných lokalitách.	66
Obrázek 5.14: Relativní zastoupení hlavních solí na studovaných lokalitách – varianta a).	69
Obrázek 5.15: Relativní zastoupení hlavních solí na studovaných lokalitách – varianta b).	69
Obrázek 6.1: Vývoj zbarvení jádra - jádro 3/28.....	70
Obrázek 6.2: Vývoj hmotnostní vlhkosti v čase – jádro 3/28.	71
Obrázek 6.3: Vývoj zbarvení jádra – jádro 3/54.	71
Obrázek 6.4: Vývoj hmotnostní vlhkosti v čase – jádro 3/54.	72
Obrázek 6.5: Vývoj zbarvení jádra – jádro 3/6.	72
Obrázek 6.6: Vývoj hmotnostní vlhkosti v čase – jádro 3/6.	73
Obrázek 6.7: Model pokusu s kritickou hodnotou kapilární výšky	74

Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Hodnoty rovnovážných relativních vlhkostí při teplotě 20 °C pro vybrané soli.....	2
Tabulka 3.1: Přehled studovaných oblastí z hlediska výskytu solí.....	10
Tabulka 5.1: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Mladějov 1	27
Tabulka 5.2: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Mladějov 2	28
Tabulka 5.3: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Malobratřice	28
Tabulka 5.4: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Radvánovice.....	29
Tabulka 5.5: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Drábovna.....	29
Tabulka 5.6: Hodnoty průměrných koncentrací a mediánů koncentrací iontů na lokalitách v Českém ráji a okolí.	31
Tabulka 5.7: Korelace stanovených iontů na lokalitách v Českém ráji a okolí.	32
Tabulka 5.8: Zastoupení jednotlivých solí na lokalitách v Českém ráji a okolí.	33
Tabulka 5.9: Hodnoty poměrů celkové mineralizace mezi hřebítky a důlky jednotlivých voštin na lokalitách v Českém ráji a okolí.....	34
Tabulka 5.10: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokalit na Dvořákově stezce.....	35
Tabulka 5.11: Hodnoty průměrných koncentrací a mediánů koncentrací iontů na lokalitách na Dvořákově stezce.	37
Tabulka 5.12: Korelace stanovených iontů na lokalitách na Dvořákově stezce.	38
Tabulka 5.13: Zastoupení jednotlivých solí na lokalitách na Dvořákově stezce.	39
Tabulka 5.14: Hodnoty poměrů celkové mineralizace mezi vnějšími a vnitřními částmi jednotlivých tafone na lokalitách na Dvořákově stezce.	40
Tabulka 5.15: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Čertova kazatelna.	41
Tabulka 5.16: Hodnoty průměrných koncentrací a mediánů koncentrací iontů na lokalitě Čertova kazatelna.....	43
Tabulka 5.17: Korelace stanovených iontů na lokalitě Čertova kazatelna.....	43
Tabulka 5.18: Souhrn zastoupení jednotlivých solí na lokalitě Čertova kazatelna – varianta a).....	44
Tabulka 5.19: Souhrn zastoupení jednotlivých solí na lokalitě Čertova kazatelna – varianta b).....	44
Tabulka 5.20: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Petra.....	47
Tabulka 5.21: Hodnoty průměrných koncentrací a mediánů koncentrací iontů na lokalitě Petra.	49
Tabulka 5.22: Korelace stanovených iontů na lokalitě Petra.	49
Tabulka 5.23: Souhrn zastoupení jednotlivých solí na lokalitě Petra.	51
Tabulka 5.24: Obsahy solí na lokalitě Petra – shrnutí.....	52
Tabulka 5.25: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Crystal Peak.....	54
Tabulka 5.26: Hodnoty průměrných koncentrací a mediánů koncentrací iontů na lokalitě Crystal Peak – vzorky obsahující anorganický uhlík.	56
Tabulka 5.27: Hodnoty průměrných koncentrací a mediánů koncentrací iontů na lokalitě Crystal Peak – vzorky neobsahující anorganický uhlík.	56
Tabulka 5.28: Korelace stanovených iontů na lokalitě Crystal Peak pro vzorky obsahující anorganický C.....	57
Tabulka 5.29: Korelace stanovených iontů na lokalitě Crystal Peak pro vzorky neobsahující anorganický C.....	57
Tabulka 5.30: Obsah solí ve vzorcích obsahující anorganický uhlík.....	58

Tabulka 5.31: Obsah solí ve vzorcích neobsahující anorganický uhlík	59
Tabulka 5.32: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Helper.	60
Tabulka 5.33: Hodnoty průměrných koncentrací a mediánů koncentrací iontů na lokalitě Helper..	62
Tabulka 5.34: Korelace stanovených iontů na lokalitě Helper.	63
Tabulka 5.35: Zastoupení solí na lokalitě Helper.	63
Tabulka 5.36: Obsahy solí na studovaných lokalitách uvedeny v hmotnostních procentech.	64
Tabulka 5.37: Mediány koncentrací všech studovaných iontů na všech studovaných lokalitách.....	67
Tabulka 5.38: Průměrné hodnoty koncentrací všech studovaných iontů na všech studovaných lokalitách.	67

Seznam příloh

Příloha 1. Seznam všech loužených vzorků na lokalitě Čertova kazatelna.....	a
Příloha 2. Výsledky chemických analýz na studovaných lokalitách.....	d

1. Úvod

Solné a mrazové zvětrávání je považováno za nejrozšířenější procesy odpovědné za rozpad přípovrchové zóny pískovce. Transport vody je nezbytným faktorem pro vznik solného zvětrávání, protože umožňuje migraci rozpuštěných solí do zón výparu, kde dochází k jejich krystalizaci (Huinink et al. 2004, Steiger et al. 2011). Voda může být v porézním prostředí přítomna v kapalně nebo plynné formě. V kapalně formě se voda do nenasycené zóny horninového prostředí dostává infiltrací srážkové vody, nebo kapilárním vztlínáním podzemní vody, v plynné formě pak kondenzací nebo absorpcí ze vzdušné vlhkosti na povrch hygroskopických solí (Charola 2000).

Solné zvětrávání nastává jako výsledek fázové přeměny mezi roztokem a pevnou fází, která silně závisí na přírodních podmínkách okolního prostředí, hlavně na relativní vlhkosti (RH) a teplotě (Rodriguez-Navarro et al. 1999, Charola 2000, Lombardo et al. 2004). K rozpouštění solí dochází, pokud relativní vlhkost okolního prostředí vzroste nad hodnotu jejich rovnovážné relativní vlhkosti (Charola 2000). Hodnoty rovnovážných relativních vlhkostí se značně liší a soli s nízkými hodnotami RH jsou v podmínkách humidního prostředí velmi náchylné k rozpouštění (Goudie 2013). V tabulce č. 1.1 uvádím hodnoty rovnovážných relativních vlhkostí pro nejběžněji se vyskytující soli (upraveno dle Arnold a Zehnder 1990). Závislost rozpustnosti na teplotě je méně významná a projevuje se pouze u některých typů solí (Rodriguez-Navarro et al. 1999). Rozpustnost výrazně klesá s poklesem teploty zvláště u síranu sodného (minerály thenardit a mirabilit) a dusičnanu sodného (minerál nitronatrit), v menší míře i u síranu vápenatého (minerály sádrovec a anhydrit) a chloridu sodného (minerál halit). V důsledku toho soli krystalizují díky poklesu teploty, například během noci (Goudie 2013).

Tabulka 1.1: Hodnoty rovnovážných relativních vlhkostí při teplotě 20 °C pro vybrané soli (upraveno dle Arnold a Zehnder 1990); pozn.: Síran draselný se jako minerál (arkanit) vyskytuje velmi vzácně, proto v tomto případě uvádím v tabulce pouze jeho chemický název. Častěji se vyskytují kombinace síranů s ionty vápníku, hořčíku a draslíku – např. minerál syngenit s chemickým vzorcem $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$ či minerál polyhalit $K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$ (J. Bruthans – písemné sdělení 2017).

název	chemický vzorec	rovnovážná RH %
sádrovec	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	100,0
síran draselný	K_2SO_4	97,6
nitrokalit	KNO_3	94,6
syngenit	$K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$	93,7
mirabilit	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	93,6
epsomit	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	90,1
sylvín	KCl	85,1
thenardit	Na_2SO_4	82,0
halit	$NaCl$	75,5
nitronatit	$NaNO_3$	75,4
antarkticit	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	30,8

Přesycený roztok, ze kterého krystalizují soli, tedy může vzniknout odpařením, změnou teploty nebo hygroskopií (Rodriguez-Navarro et al. 1999, Charola 2000, Lombardo et al. 2004). Lokalizace místa rozpadu horniny je vázána na prostor, kde dochází k výparu a tedy i nahromadění roztoku a srážení solí. Během každého cyklu smáčení a vysychání je povrch horniny oslabován především díky krystalizaci solí (Turkington a Paradise 2005). Intenzita a charakter zvětrání velmi závisí na době trvání, četnosti a intenzitě jednotlivých výparových period (Huinink et al. 2004). Krystalizace nastává přednostně v horninách se středně velkými až velkými póry (o průměru 1 – 10 μm), (Charola 2000), protože umožňují transport rozpuštěných solí. Větší a propojené póry také umožňují lepší odpařování vody z přípovrchové zóny horniny (Adamovič 2011). Bruthans et al. (2014) a Řihošek et al. (2016) se zabývali působením gravitačního horninového napětí (stresu) a uvádějí, že horninové napětí významně snižuje účinek solného a mrazového zvětrávání. Pokusy Řihoška et al. (2016) ukázaly, že totožné vzorky pískovce vystavené stejnému množství soli se mohou rozpadat různou rychlostí pouze díky rozdílům ve velikosti horninového napětí. Míra zvětrání závisí i na expozici a sklonu skály či na pokrytí výchozu lišejníky (Řihošek et al. 2016).

Soli mohou být součástí samotné horniny, nebo pocházet z půdy, podzemní vody, povrchových toků, oceánů, atmosférické depozice, či z různých antropogenních zdrojů. Do horniny se mohou dostat také v důsledku činnosti mikroorganismů (Přikryl et al. 2007, Ruedrich a Siegesmund 2007). Solné roztoky v podzemních, půdních a povrchových vodách obsahují nejčastěji ionty Na, K, Mg, Ca, SO₄, CO₃, NO₃ a Cl (Arnold a Zehnder 1990).

Stěžejním cílem této diplomové práce bylo zjištění hlavních iontů tvořících soli v přípovrchové zóně pískovce a dalších poréznych hornin (arkózy, tufy) v prostředí humidního i aridního klimatu. Studované vzorky pocházely z několika lokalit v České republice (Český ráj, Dvořákova stezka, Čertova kazatelna) i ve světě (Jordánsko – lokalita Petra, USA, Utah – lokality Helper a Crystal Peak). Identifikaci jednotlivých solí jsem provedla na základě chemických analýz loužených vzorků odebraných z přípovrchové zóny horniny. Metoda loužení se vedle rentgenové difrakční analýzy (XRD) běžně používá pro určení chemického složení vzorků hornin (jako např. v Přikryl et al. 2007) a je nejběžnější analytickou metodou používanou ke studiu mineralogického složení solí. Rentgenová difrakční analýza je jedinou metodou, která jednoznačně prokáže výskyt dané minerální fáze (Adamovič et al. 2011), její detekční limit je však 2 – 4 hm. % (Přikryl et al. 2007). Méně zastoupené složky jsme schopni určit pomocí loužící metody, při které jsou soli v nadrceném materiálu rozpuštěny v destilované vodě, a jejich koncentrace je analyzována běžnými metodami používanými pro chemické rozbor podzemních vod. Výstupem metody loužení je tedy zastoupení iontů, nikoli minerálů, a minerální fáze jsou pak určeny nepřímou (z jednotlivých iontů se mohou skládat různé soli). Touto metodou, na rozdíl od metody XRD, nejsme schopni rozlišit hydratovanou a dehydratovanou formu daného minerálu, proto tyto formy daného minerálu ve výsledcích nerozlišuji. Další nevýhodou loužící metody je, že ji lze použít pouze pro dobře rozpustné minerály (soli), a je nepoužitelná např. pro karbonáty díky jejich malé rozpustnosti v destilované vodě. Pomocí metody XRD oproti tomu není možné identifikovat rozpuštěné a amorfni fáze (Přikryl et al. 2007, Adamovič et al. 2011). Ideální možností je tedy kombinovat rentgenovou difrakční analýzu a výsledky loužení (jako např. v Přikryl et al. 2007), proto jsem se při vyhodnocení chemických analýz řídila rešeršními údaji o výskytu solí určených na studovaných lokalitách pomocí XRD.

Výskyt zjištěných solí jsem dále porovnávala s hodnotami relativní vlhkosti, měřenými na všech studovaných lokalitách čidly Voltcraft DL121TH. V důležitých případech uvádím

naměřená data relativní vlhkosti z doby odběru vzorků v souvislosti s výsledky zastoupení solí na dané lokalitě v kapitole 5. Výsledky loužení solí.

Jelikož je pro vznik projevů solného zvětrávání kritickým faktorem i způsob transportu vody v hornině, bylo další náplní mé práce pozorování, při kterém jsem v laboratoři pomocí barviva fluoresceinu zviditelnila kapilární vzlínání roztoku a identifikovala kapilární výšku, která je rozhodující pro vznik voštin.

2. Solné zvětrávání

2.1. Vliv složení solného roztoku na intenzitu zvětrávání

Velmi důležitým parametrem ovlivňujícím chování solí je celkové složení solného roztoku. V přírodě bývá solné zvětrávání zřídka způsobeno pouze jednou solí a je velmi obtížné předpovědět chování solí v roztoku na základě laboratorních experimentů s jednotlivými solemi (Robinson a Williams 2000). Společný výskyt více solí v roztoku ovlivňuje hlavně rozpustnost jednotlivých solí. Pokud se současně vyskytují soli, které nemají žádný společný iont (například halit a sádrovec), rozpustnost obou solí je vyšší díky vyšší iontové síle roztoku a nárůst rozpustnosti je větší pro méně rozpustnou sůl v roztoku (v tomto případě sádrovec). Pokud se v roztoku vyskytují soli, které mají společný iont, rozpustnost obou klesne. Rozpustnost méně rozpustné soli bude i v tomto případě ovlivněna více. Toto tvrzení však neplatí vždy – například rozpustnost minerálu nitrokalitu (dusičnanu draselného) vzroste v přítomnosti dalších dusičnanů. Také je potřeba vzít v úvahu pořadí, v jakém se soli sráží z původního roztoku. Během výparu se obvykle vytvářejí první krystaly té soli, která je nejméně rozpustná a zbývající roztok se tak stává přesyceným (Charola 2000).

Rozpouštění jedné soli roztokem druhé soli o jiném iontovém složení může vést k rekrystalizaci a vzniku nové soli, která nebyla obsažena v původním roztoku. Tento mechanismus se uplatňuje hlavně v aridních a semiaridních oblastech, kde je dostupnost vody limitujícím faktorem a je běžný i v místech, kde soli pocházejí z různých zdrojů a jejich složení se mění v čase, jako např. na mořských útesech či na stavebních materiálech v městských oblastech. Vzhledem k měnícím se podmínkám vlhkosti a teploty v čase je velmi obtížné předpovědět vliv solí na zvětrání, i když známe iontové složení a koncentraci smíšených roztoků (Robinson a Williams 2000). Mnoho laboratorních experimentů, které se zabývaly zvětrávacími vlastnostmi jednotlivých solí, ukázalo, že síran sodný (minerály thenardit a mirabilit) a síran hořečnatý (minerály epsomit a hexahydrit) působí značně destruktivně, zatímco síran vápenatý (sádrovec a anhydrit) a chlorid sodný (halit) jsou mnohem méně agresivními zvětrávacími činiteli (Williams a Robinson 1998).

Některé běžně se vyskytující soli relativně snadno hydratují a dehydratují v závislosti na změnách teploty a vlhkosti. Během přeměny bezvodé fáze na hydratovanou je voda absorbována do krystalové struktury minerálu. Tím pádem se zvětšuje objem soli a vytváří tlak na stěny pórů horniny. Nárůst objemu je značný hlavně u síranu sodného (až o 315 %).

Stres způsobený hydratací minerálu se může cyklicky opakovat, čímž narůstá míra destrukce (Goudie 2013).

Chováním nejběžněji se vyskytujících solí se podrobněji zabývala řada autorů (např. Williams a Robinson 1998, Robinson a Williams 2000, Flatt 2002, Lombardo et al. 2004, Schweigstilllová 2009), jejichž poznatky shrnuji v následující kapitole 2.2. Přehled účinků nejběžněji se vyskytujících solí.

2.2. Přehled účinků nejběžněji se vyskytujících solí

V osídlených oblastech střední Evropy se velmi často vyskytují minerály tvořené sírany, protože hlavním produktem znečištění ovzduší bývají oxidy síry vznikajících spalováním fosilních paliv (např. Steiger a Asmussen 2008, Schweigstilllová 2009, Vařilová et al. 2011). Tvoří se hlavně akumulace síranu vápenatého – sádrovce (díky jeho nízké rozpustnosti), který je sám o sobě relativně neúčinným destrukčním činitelem (Robinson a Williams 2000), jeho přítomnost ve složených roztocích však výrazně zvyšuje poškození způsobené dalšími solemi (Williams a Robinson 1998).

Halit se často vyskytuje hlavně v aridních a pobřežních oblastech, a také v osídlených oblastech, kde je chlorid sodný používán k solení silnic. Lombardo et al. (2004) uvádí, že pozorování pomocí elektronového skenovacího mikroskopu a optického mikroskopu ukázala, že rozpouštění a srážení halitu je velmi závislé na četnosti a intenzitě výpadových period, tedy na změnách vlhkosti. K rozpouštění halitu dochází při překročení hodnoty 75,5 % relativní vlhkosti a jeho rozpustnost téměř nezávisí na teplotě (Lombardo et al. 2004). Proto je také halit výraznějším destrukčním činitelem v aridních oblastech. Naopak v humidním klimatu České republiky se halit může tvořit pouze v letních měsících během dne na osluněných partiích skalních výchozů nebo se vyskytovat pouze v rozpouštěné formě (J. Bruthans – ústní sdělení 2017).

Síran sodný je nejdestruktivnější známou solí. Za běžných teplot se vyskytují dvě stabilní fáze: bezvodá sůl thenardit Na_2SO_4 a hydratovaná forma mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), (Flatt 2002, Ruedrich a Siegesmund 2007). Bezvodá forma nevzniká pouze dehydratací mirabilitu, ale může krystalizovat přímo z roztoku (Steiger a Asmussen 2008). Flatt (2002) uvádí, že fázová přeměna mezi těmito dvěma minerály nastává při teplotě 20 °C za relativní vlhkosti kolem 75 %, přičemž bezvodá forma je stabilnější při nižších vlhkostech. Největší poškození síranem sodným nastává během zvlhčovací fáze, kdy se jako výsledek rozpouštění bezvodého síranu sodného tvoří silně přesycený roztok mirabilitu (Flatt 2002).

Rozpustnost mirabilitu velmi silně závisí na teplotě, nad 32 °C přestává být stabilní. Tvorba hydratované formy je tedy dána rozdíly v rozpustnosti těchto dvou minerálů a teplotou prostředí. Krystalizační tlak narůstá se stupněm přesycení roztoku a intenzitou výparu (Flatt 2002, Steiger a Asmussen 2008).

Alunogen [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$] a alumy [$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$], [$\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$], [$(\text{KNH}_4)\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$] se podílejí na solném zvětrávání v oblasti tzv. černého trojúhelníku (hraniční oblast mezi Českou republikou, Německem a Polskem), kde se vyskytují společně se sádrovcem (Williams a Robinson 1998, Schweigstillová 2009). Sírany pocházejí převážně ze silně znečištěné atmosféry, jílové minerály jsou zdrojem hliníku, který je pravděpodobně uvolňován díky reakci s kyselou srážkovou vodou. Zdrojem iontů draslíku a amoniaku je hlavně atmosférická depozice (Schweigstillová 2009). Sírany mohou pocházet také ze zvětrávání pyritu (Williams a Robinson 1998, Robinson a Williams 2000). Williams a Robinson (1998) provedli řadu laboratorních pokusů, při kterých studovali zvětrávací účinek těchto solí, a jejich experimenty ukázaly, že alunogen způsobuje poměrně malé škody, zatímco alumy jsou velmi destruktivní a jejich účinky mohou být srovnatelné s účinky síranu sodného. Experimenty dále ukazují, že sádrovec snižuje účinky alunogenu, zatímco zvyšuje účinky alumů (Williams a Robinson 1998).

Dusičnan sodný (minerál nitronatrit) je silně hygroskopickou solí. V porovnání s ostatními solemi je značně rozpustný, tím pádem vzniká dostatek přesyceného roztoku, ze kterého může nitronatrit znovu krystalizovat v pórovém prostoru a tak způsobit značné poškození horniny. Když relativní vlhkost vzroste nad kritickou hodnotu RH – 75,4 %, voda kondenzuje na povrchu minerálu a rozpouští ho. Pokud relativní vlhkost klesá pod kritickou hodnotu, nitronatrit se znovu sráží. Oscilace kolem hodnoty kritické RH je tedy hlavním faktorem kontrolujícím frekvenci a počet krystalizačních cyklů (Goudie 2013). Nitronatrit je 10 – 100 krát destruktivnější než sádrovec (Robinson a Williams 2000).

2.3. Projevy solného zvětrání

Solné zvětrávání zahrnuje řadu chemických i mechanických procesů. Experimentální studie ukázaly, že z mechanických procesů je nejdůležitější růst krystalů z roztoku v pórech a puklinách horniny (Goudie 2013). Soli mohou krystalizovat na povrchu horniny, kde vytváří solné výkvěty či kompaktní krusty (eflorescence) nebo pod povrchem horniny (subflorescence). Zatímco povrchové akumulace solí nezpůsobují obvykle větší škody, krystalizace solí pod povrchem horniny bývá příčinou různých projevů poškození

– odlupování, praskání, rozpadu na jednotlivá zrna či kavernózního zvětrávání (Lombardo et al. 2004, Broggi et al. 2012).

Kavernózní zvětrávání je nejviditelnějším projevem solného zvětrávání. Rozlišujeme dva základní typy tohoto zvětrání – tafoni a voštiny. Tafoni jsou sféroidní nebo eliptické dutiny s klenutými vchody, převislými okraji a mírně skloněným dnem většinou pokrytým opadaným materiálem (Turkington a Phillips 2004). Jejich rozměry se pohybují od pár centimetrů až do několika metrů. Převislé části tafoni se nejčastěji nazývají visory. Voštiny jsou tvořeny sítí menších těsně přiléhajících dutin zpravidla o velikosti několika centimetrů, oddělených tenkými stěnami (Goudie 2013). Rozlišujeme u nich tzv. hřbítky (vystupující části skály) a důlky. Jejich vývoj je velmi rychlý a byly pozorovány na površích hladkých před méně než sto lety (Mustoe 1982).

Tafoni i voštiny se vyskytují jak v aridním, tak humidním prostředí v chladném i teplém klimatu. Voštiny přednostně nalezneme v humidním klimatu na mírně převislých stěnách chráněných před deštěm, tafoni jsou naopak pozorovány na vertikálních nebo nakloněných stěnách vystavených dešti. Kavernózní zvětrávání se vyskytuje na různých horninách – pískovcích, slepencích, vápencích, žulách či tufech (Turkington a Phillips 2004, Goudie 2013), nejčastěji je však pozorováno na pískovcích, granitech a tufech (Paradise 2013).

Vznik voštin a tafoni je nejčastěji vysvětlován dvěma teoriemi. První teorie – case hardening (tj. zpevnění svrchní vrstvy skály způsobené různými procesy) říká, že hřbítky jednotlivých voštin jsou tvořeny pevnou krustou a díky tomu jsou odolnější proti zvětrání (např. Mottershead a Pye 1994). Krusta bývá zpevňována srážením různých látek (železa, oxidu křemičitého, solí) obsažených v pórových vodách (Adamovič et al. 2011). Obecně se předpokládá vznik této krusty souběžně s procesem oslabování hornin mělce pod povrchem (Turkington a Paradise 2005). Porušení této krusty pak umožňuje lokální odpařování vody z pórů a destrukční efekt způsobeným růstem krystalů se tak soustřeďuje v důlku voštiny (Adamovič et al. 2011). Hypotézu case hardening nepotvrzují např. McBride and Picard (2000), Matsukura a Tanaka (2000) či Bruthans et al. (2017 – v revizi) na základě jejichž měření mají hřbítky stejnou pevnost jako důlky.

Druhá teorie – tzv. hydraulická hypotéza, prezentovaná např. Huininkem et al. (2004), říká, že míra zvětrání je kontrolována prouděním vody a výparovou frontou. Podle Huininka et al. (2004) je tento proces řízen rychlostí vypařování. Při dlouhé době trvání

vysoušecí fáze ztrácí výparová fronta kontakt s významnou částí povrchu horniny a více solí se tak akumuluje v prohlubních, kde je menší rychlost vypařování. Na takovýchto výchozech poté vznikají kavernózní struktury. Tuto hypotézu potvrzují i Svobodová (2015) a Bruthans et al. (2017 – v revizi) na základě pozorování kapilární fronty pomocí barviva fluoresceinu a měření sacího tlaku. Laboratorní experimenty a terénní měření Svobodové (2015) ukazují, že při nízkém obsahu vlhkosti a vysokém sacím tlaku se výparová fronta dostane pouze do důlků voštin, zatímco hřebítky zůstanou suché. Naopak při intenzivním proudění vody z masivu k povrchu se výparová fronta nachází na hřebíčcích, zatímco důlky jsou součástí kapilární zóny. Solné zvětrávání tak buď rozšiřuje důlky, nebo zarovnáva povrch skály v závislosti na poměru přísunu vody z horninového masivu a potenciální evaporace (Bruthans et al. 2017). S pomocí modelu Huininka et al. (2004) lze vysvětlit i tendenci růstu tafone směrem vzhůru ve vertikální stěně, protože strop tafone je skryt před sluncem a tudíž zde dochází k menšímu výparu než ve spodní části tafone (Svobodová 2015).

3. Studované lokality

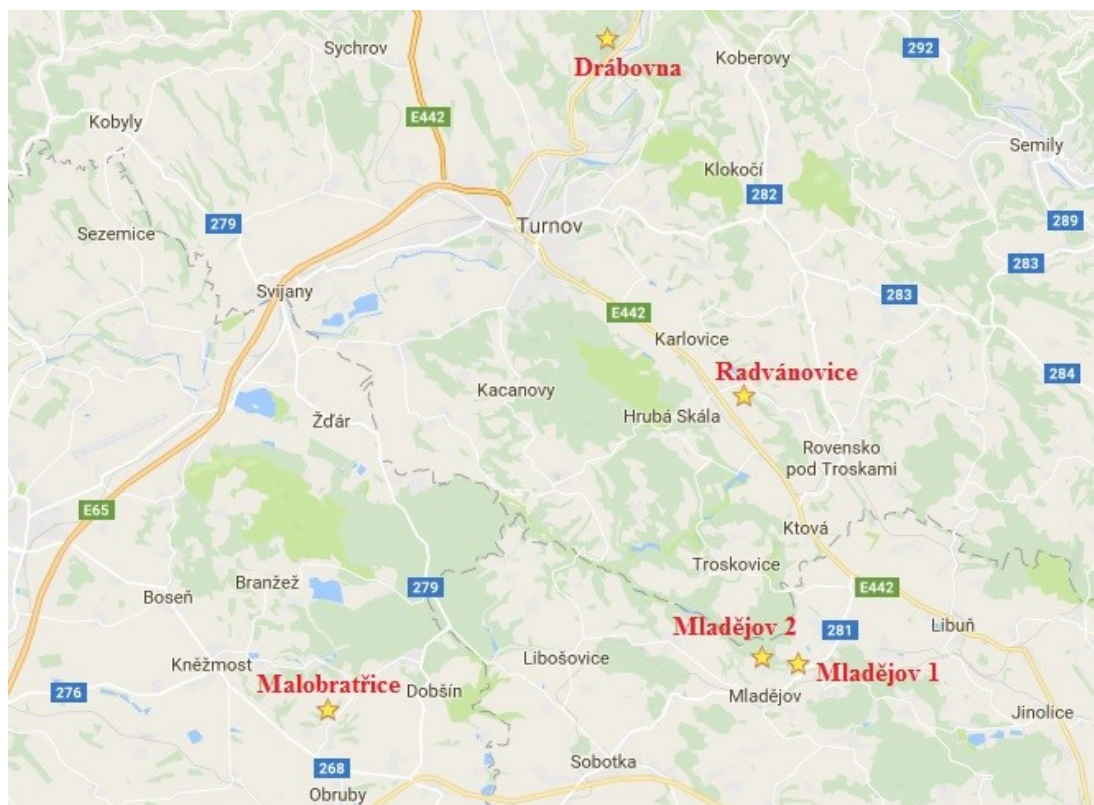
Loužené vzorky pochází z několika lokalit v České republice z hornin české křídové pánve (Český ráj) a permokarbonu (Dvořákova stezka, Čertova kazatelna), a ze zahraničních lokalit, z pískovců, arkóz a tufů různého stáří (Jordánsko – lokalita Petra, USA, Utah – lokality Helper a Crystal Peak). V následující tabulce 3.1 uvádím přehled studovaných oblastí, stáří a litologii studovaných hornin.

Tabulka 3.1: Přehled studovaných oblastí z hlediska výskytu solí.

lokalita	stáří	litologie
Český ráj, Turnov, Česká republika	křída	pískovce
Dvořákova stezka, Kralupy nad Vltavou, Česká republika	karbon	arkózy
Čertova kazatelna, Plzeň, Česká republika	karbon	arkózy
Petra, Jordánsko	kambrium-ordovik	arkózy a pískovce
Helper, Utah, USA	křída	pískovce
Crystal Peak, Utah, USA	paleogén	tufy

3.1. Lokality v Českém ráji, Česká republika

V oblasti CHKO Český ráj a jejím okolí jsem s kolegy odebírala vzorky na několika lokalitách – Mladějov 1, Mladějov 2, Malobratřice, Drábovna a Radvánovice. Studované lokality se nachází 45 – 80 km S a SV od Prahy v okolí města Turnov (obrázek 3.1). Na skalních výchozech zde můžeme pozorovat různé typy voštín (obrázek 3.2), tafoni zde přítomny nejsou (Mikuláš 2007). Velikost voštín se pohybuje mezi 2 – 5 cm, výjimečně až 12 cm, a hloubka jednotlivých důlku je 1 – 5 cm (Bruthans et al. 2017 – v revizi). Výchozy jsou tvořeny dobře vytríděnými a slabě cementovanými hrubozrnnými křemennými pískovci české křídové pánve. Jedná se o mořské sedimenty hrubozrnné delty, tvořící vrstvy o mocnosti od pár desítek centimetrů do několika metrů (Mikuláš 2001, Uličný 2001). Pískovec je tvořen z 95 – 99 % SiO_2 , 0,5 – 3,4 % Al_2O_3 a 0,05 – 1,1 % Fe_2O_3 , jemnozrnná frakce pak kaolinitem (75%), křemenem (24%) a ilitem (1%), (Bruthans et al. 2012).



Obrázek 3.1: Mapa lokalit v Českém ráji a okolí, upraveno podle www.google.cz/maps.

Nadmořská výška studovaných oblastí se pohybuje mezi 280 – 425 m. n. m. a průměrné roční srážky mezi 595 – 700 mm (1981 – 2010). Průměrná regionální evapotranspirace je zde podle Českého Hydrometeorologického Institutu 70 – 85 % (Bruthans et al. 2017 – v revizi). Jedná se tedy o humidní klima. Solné výkvěty v oblasti Českého ráje a okolí jsou tvořeny hlavně sádrovcem a alumy (Schweigstilllová a Hradil 2007, Adamovič et al. 2011).

3.1.1. Lokalita Mladějov 1

Tato lokalita se nachází SV od obce Mladějov, cca 1 km JZ směrem od vrátnice lomu Střeleč. Nadmořská výška lokality je cca 280 m. n. m. (Slavík 2014). Vyskytují se zde přírodní výchozy jemných až hrubozrnných pískovců turonského až coniackého stáří (Uličný 2001). Některé stěny jsou pokryty solemi či voštinami. Lokalita se nachází v lese, je zde tedy vysoká relativní vlhkost vzduchu a nižší intenzita slunečního svitu (Slavík 2014). Průměrná roční teplota je 9,5 °C a průměrná relativní vlhkost 85 % (Bruthans et al. 2017 – v revizi).

3.1.2. Lokalita Mladějov 2

Tato lokalita se nachází cca 850 m SZ směrem od lokality Mladějov 1 ve stejné nadmořské výšce (Slavík 2014). Nachází se zde přírodní výchozy svrchně turonských až coniackých hrubě zrnitých pískovců teplického souvrství (Uličný 2001). Tato oblast byla v minulosti vykácena, je tu tedy na rozdíl od lokality Mladějov 1 nižší relativní vlhkost vzduchu a přímé oslunění (Slavík 2014). Průměrná roční teplota je zde 12,3 °C a průměrná relativní vlhkost 72 % (Bruthans et al. 2017 – v revizi).

3.1.3. Lokalita Malobratřice

Lokalita Malobratřice se nachází cca 400 – 450 m severně od obce Malobratřice. Nadmořská výška této oblasti se pohybuje mezi 285 – 290 m. n. m. Jedná se o přírodní výchozy bělošedých křemenných pískovců coniackého stáří. Výchozy jsou tvořeny hrubozrnnými pískovci, na jejichž povrchu jsou četné voštiny a soli (Slavík 2014). Průměrná roční teplota je zde 9,7 °C a průměrná relativní vlhkost 88 %. Lokalita se nachází v lese (Bruthans et al. 2017 – v revizi).

3.1.4. Lokalita Radvánovice

Tato lokalita se nachází v obci Radvánovice, jižně od zábavního dětského areálu Šťastná země. Nadmořská výška této oblasti je cca 300 m. n. m. Skalní výchozy se nachází v lese a jsou tvořeny středně až hrubě zrnitými křemennými pískovci turonského až coniackého stáří (Geologická mapa ČGS 1:50 000 – mapa 0334 – Sobotka, legenda č. 288; staženo z mapy.geology.cz/geocr_50/). Na této lokalitě nebylo umístěno čidlo pro měření teploty a relativní vlhkosti, proto zde neuvádím průměrné hodnoty teploty a relativní vlhkosti.

3.1.5. Lokalita Drábovna

Lokalita Drábovna leží cca 600 m JZ směrem od osady Záboreč (JZ od Malé Skály). Lokalita se nachází v lese na hraně otevřeného údolí řeky Jizery v nadmořské výšce 420 – 430 m. n. m. Vyskytují se zde jemnozrnné až středně zrné pískovce coniackého stáří. Stěny jsou hojně pokryty solemi a tvoří se zde i voštiny. Nachází se tu také jeskyně Tří postav o délce několika metrů (Slavík 2014). Na výchozech je pozorovatelný intenzivní rozpad povrchu pískovce (Svobodová 2015). Průměrná roční teplota je zde 9,8 °C a průměrná relativní vlhkost 83 % (dle Bruthans et al. 2017 – v revizi).



Obrázek 3.2: Voština na lokalitě Drábovna, foto: M. Filippi.

3.2. Lokality na Dvořákově stezce, Česká republika

Vzorky byly odebírány na dvou lokalitách nacházejících se na Dvořákově stezce lemující levý břeh Vltavy, jejichž lokalizace je vyznačena na obrázku 3.3. První lokalita (lokalita 1) leží asi 400 m severně od Kralup nad Vltavou, druhá lokalita (lokalita 2) je od té první vzdálena asi 150 m směrem k Nelahozevsi. Studované lokality se nachází v nadmořské výšce 180 m. n. m.



Obrázek 3.3: Mapa lokalit 1 a 2 na Dvořákově stezce, upraveno podle mapy.cz.

Jedná se o výchozy permokarbonských hornin tvořených arkózami nýřanských vrstev (svrchní část kladenského souvrství) karbonského stáří. V nejvyšší části srázů (mimo zájmovou lokalitu) vystupují i svrchnokřídové uloženiny perucko-korycanského souvrství (Geologická mapa ČGS 1:50 000 – mapa 1221 – Kralupy nad Vltavou, legenda č. 313; staženo z mapy.geology.cz/geocr_50/). Arkózy jsou zde pevnější a na zvětralých plochách lze pozorovat šikmé i čočkovité zvrstvení a tenké slepencové polohy. Místy se zde vyskytují laminy zuhelnatělé hmoty (Chlupáč 1999). Lokalita byla vybrána a studována z důvodu výskytu tafoni (obrázek 3.4). Ve vzorcích ze solných krust odebraných z povrchu tafoni určil pomocí XRD M. Filippi (2015 – nepublikováno) minerál sádrovec, epsomit a hexahydrít. Průměrná relativní vlhkost vzduchu na této lokalitě je na základě dat z čidel 85 %.



Obrázek 3.4: Tafoni na Dvořákově stezce, foto: J. Bruthans.

3.3. Lokalita Čertova kazatelna, Česká republika

Další vzorky hornin, které jsem měla k dispozici, byly odebírány z pískovcového výchozu “Čertova kazatelna” nacházejícího se v západní části města Plzeň (obrázek 3.5). Výchoz je tvořen arkózovým pískovcem a slepencem nýřanských vrstev kladenského souvrství, které náleží do svrchního karbonu (Opluštil et al. 2005). Vyskytují se zde pískovcové skalní útvary, jako jsou tafoni a voštiny (Vítek 1987). Solné výkvěty jsou běžné na výchozech chráněných před deštěm. Hlavním minerálem solných výkvětů potvrzeným analýzou XRD je sádrovec. Siltová a jílovitá frakce je složena z křemene, kaolinitu, ilitu a draselného živce (Bruthans et al. 2017).



Obrázek 3.5: Mapa lokality Čertova kazatelna, upraveno podle mapy.cz.

Podrobněji byl studován pískovcový převis v nejvýchodnější části masivu Čertovy kazatelny (obrázek 3.6), který je extrémně náchylný k erozi (strop převisu je erodován rychlostí okolo 14 mm za rok). Litologicky se jedná o hrubozrnný pískovec a slepenec s klasty křemene o velikosti až 5 cm. Mimo převis je povrch skály tvořen pevnější krustou (case hardening), jejíž zbytky se nacházejí i na stěnách převisu. Soli se v zájmovém převisu vyskytují pouze dočasně v teplejších a sušších obdobích roku (Bruthans et al. 2017). Bruthans et al. (2017) uvádí jako hlavní příčinu rychlé eroze převisu jeho výrazné zvlhčení způsobené prosakováním vody z kanalizace. Eroze nastává hlavně v zimních měsících, kdy

dochází k cyklickému mrznutí a tání. Další vzorky byly odebrány z lokality U dubu, která se nachází asi 50 m západně od studovaného převisu a nedochází zde k prosakování z kanalizace.



Obrázek 3.6: Studovaný převis na lokalitě Čertova kazatelna, foto: J. Bruthans.

Studovaná oblast leží v nadmořské výšce 315 m. n. m. Průměrné roční srážky jsou zde 527 mm a průměrná teplota 7,5 °C (stanice Plzeň-Bolevec, 1961 – 1990). Průměrná regionální evapotranspirace podle Českého Hydrometeorologického Institutu je 90%. Jedná se tedy o humidní klima. Obsah vlhkosti přípovrchové zóny horniny (v hloubce 0 – 5 mm) kolísá během roku. Nejvyšších hodnot dosahuje v zimě – 12 – 18 hm. %, zatímco v létě se pohybuje mezi 1 – 5 hm. %. Zájmový převis je vystaven přímému slunečnímu svitu (Bruthans et al. 2017).

3.4. Lokalita Petra, Jordánsko

Pro porovnání dat z České republiky s odlišným prostředím aridního klimatu jsem měla k dispozici vzorky z města Petra řazeného mezi památky světového dědictví UNESCO. Petra se nachází v jižním Jordánsku na východním okraji riftového údolí Mrtvého moře (obrázek 3.7) v nadmořské výšce 900 – 1100 m. n. m. Průměrný roční úhrn srážek je zde 298 mm a většina z nich napadne hlavně v zimním období. Průměrná roční teplota je 22 °C (Al-Khashman 2005, Al-Khashman 2007, Strijker et al. 2012). Jedná se tedy o aridní klima.



Obrázek 3.7: Mapa lokality Petra, upraveno podle www.google.cz/maps.

Skalní město bylo vytesáno Nabatejci v období mezi lety 200 př. n. l. – 150 n. l. (Wedekind et al. 2013) do kambricko-ordovických pískovců, které jsou uloženy v komplexu prekambričských vyvřelých hornin a překryty křídovými pískovci. Nachází se zde dvě pískovcová souvrství – kambrické Umm Ishrin a ordovické Disi. Ordovické pískovce vykazují značně vyšší míru zvětrání v závislosti na struktuře horniny, která je výrazně vrstevnatá, s různě velikými zrny a dalšími nehomogenitami (Heinrichs 2008, Wedekind et al. 2013). Čtyři sta metrů mocné souvrství Umm Ishrin je tvořeno různobarevnými středně až hrubozrnnými, dobře vytříděnými křemennými zrny tmelenými kaolinitem, hematitem, goethitem a v menší míře i kalcitem (Delmonaco et al. 2013). Hrubozrnné pískovce Disi bílé až béžové barvy jsou tvořeny křemennými zrny a živci a tmeleny sekundárním křemenem a jílovými minerály. Jejich mocnost dosahuje 100 m (Wedekind et al. 2013). Všechny

monumenty v Petře vykazují určitou míru zvětrání a solné zvětrávání je jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících jejich rozpad. Na přirozených výchozech jsou pozorovatelné tafoni. K erozi skalního masivu zde významně přispívá vítr, tím, že napomáhá k uvolnění materiálu, odpařování solného roztoku a migraci fluid v hornině (Heinrichs 2008).

Podle Heinrichse (2008) je nejběžnějším minerálem v Petře halit. Dále je zde přítomen sádrovec, nitrokalit a sylvín. Geochemické analýzy srážkové vody ukázaly, že značné množství iontů tvořících soli pochází ze srážek, zvláště pokud jde o tvorbu halitu. Ionty tvořící dusičnanový minerál nitrokalit, který se vyskytuje hlavně v nižších partiích monumentů, se zde vyskytují pravděpodobně díky ustájení ovcí a oslů, které zde probíhalo po staletí (Heinrichs 2008).

Kolegové Bruthans (2014 - nepublikováno) a Řihošek et al. (2016) se podrobněji zabývali zvětráváním monumentů v Petře. Hlavním cílem jejich výzkumu byla skalní hrobka Ad-Deir (obrázek 3.8), kde dokumentovali solné výkvěty v nižších partiích pilířů a na vnější stěně v přízemí monumentu. Nejvíce solných výkvětů však pozorovali uvnitř hrobky, kde tvoří několik milimetrů silné vrstvy. I přes hojný výskyt solí, jsou na vnitřních stěnách hrobek stále pozorovatelné stopy po opracování kamene dlátem, což dokazuje, že během uplynulých 2 000 let nedošlo k opadu materiálu. Analýzy XRD ukázaly, že se jedná hlavně o halit a sádrovec, tedy ty samé soli, které způsobují rozpad fasád. V prvním patře hrobky jsou solné výkvěty naopak velmi vzácné, soli se zde však pravděpodobně vyskytují v podpovrchové vrstvě jako subflorescence.



Obrázek 3.8: Hrobka Ad-Deir, foto: O. Jäger.

Obecně byla kolegy pozorována vysoká míra rozpadu na vnějších površích chráněných před přímým deštěm vystavených intenzivnímu slunečnímu záření a občasnému proudění srážkové vody nesoucí solné ionty. Interiéry hrobek nejsou ovlivněny rozpadem nejspíše díky absenci periodické saturace anebo nedostatečnému rychlému vysušování slunečním zářením. To jasně ukazuje, že expozice horniny, tedy vystavení proudění vody a oslunění jsou nezbytnými zvětrávacími faktory v Petře (Bruthans 2014 – nepublikováno, Řihošek et al. 2016).

3.5. Lokalita Crystal Peak, Utah, USA

Lokalita Crystal Peak se nachází v hornaté poušti západního Utahu v geologické jednotce basin and range, která prodělala během terciéru výraznou extenzi, rozčleňující území do protáhlých horských hřbetů a širokých údolí s plochým dnem. Crystal Peak je dominantním kuželovitým vrcholem s průměrem 1 km při bázi, tyčící se 300 m nad okolní terén (obrázek 3.9), (McBride a Picard 2000). Vrchol je erozním zbytkem sopečného ryolitového proudu Tunnel Spring Tuff oligocenního stáří, který vyplnil hluboký erodovaný kaňon. Podloží zde tvoří vápence, břidlice a křemence spodnopaleozoického stáří (Steven 1989). Crystal Peak se nachází v nadmořské výšce 2010 m. n. m. a průměrný úhrn

srážek je 150 mm za rok (Dunn 1959). Na základě dat naměřených čidlem je zde průměrná roční teplota 12,0 °C a průměrná relativní vlhkost 46 %. Jedná se tedy o aridní klima.



Obrázek 3.9: Lokalita Crystal Peak, foto: J. Bruthans.

Na většině povrchu jsou dobře vyvinuté tafoni paralelní s vrstevnatostí tufu. Tafoni zde obvykle dosahují šířky do 4 m, aktivně se tvoří, a pokrývají až 50 % povrchu Crystal Peak (McBride a Picard 2000).

Podle McBrideho a Picarda (2000) je hlavním minerálem tvořícím solné výkvěty kalcit (10 – 40 hm. %) a halit a sádrovec tvoří méně než 0,01 hm. %. Kalcit se uvolňuje ze samotné horniny díky zvětrávacím procesům a možným zdrojem ostatních minerálů jsou solné pánve vzdálené necelých 20 km od Crystal Peaku. McBride a Picard (2000) potvrdili pomocí XRD přítomnost kalcitu, aragonitu, sádrovce, halitu a poyhalitu.

3.6. Lokalita Helper, Utah, USA

Na této lokalitě v centrálním Utahu se nachází pískovce svrchní křídý. Období svrchní křídý bylo posledním obdobím, kdy bylo území Utahu zaplaveno mělkým mořem. Eroze v aktivním orogenním severském pásu v západním Utahu poskytovala značné množství klastického materiálu do centrálního a východního Utahu. Zájmové výchozy se nachází ve východní části Wasatch Plateau a jsou tvořeny hrubozrnným pískovcem castlegatského souvrství (obrázek 3.10), které je cca 55 – 88 m mocné (Hintze 1988). Je zde dobře pozorovatelné horizontální až subhorizontální zvrstvení. Pískovec je velmi kompaktní

a rozpadá se pouze na velké bloky podél příčných puklin. Hojně se zde nachází tafone, v menší míře i voštiny (J. Bruthans 2017 – písemné sdělení). Podloží těchto pískovců tvoří blackhawské souvrství, které je významným zdrojem uhlí (Hintze 1988). Na základě dat naměřených čidlem je průměrná roční teplota na této lokalitě 12,3 °C a průměrná relativní vlhkost 38 %, lokalita se tedy nachází v prostředí aridního klimatu.



Obrázek 3.10: Lokalita Helper, foto: J. Bruthans.

Lokalizace lokalit Crystal Peak a Helper je vyznačena na obrázku 3.11.



Obrázek 3.11: Mapa lokalit Crystal Peak a Helper, upraveno podle www.google.cz/maps.

3.7. Lokalita Jestřebice, Česká republika

Z této lokality jsem měla k dispozici jádra pískovce, která jsem používala při pokusech modelování transportu roztoku a výparových zón, proto ji uvádím na konci seznamu studovaných lokalit. Jádra byla odvrtna ze zřícené skalní věže (ke zřícení došlo v polovině ledna 2014) nazývané „Jestřebická perla“ nacházející se v Šemanovickém dole cca 600 m západně od obce Jestřebice na Kokořínsku (obrázek 3.12), (J. Bruthans – písemné sdělení). Litologicky se jedná o středně zrný až jemnozrný křemenný pískovec české křídové pánve jizerského souvrství turonského stáří (Geologická mapa ČGS 1:50 000 – mapa 0244 – Štětí, legenda č. 295; staženo z mapy.geology.cz/geocr_50/).



Obrázek 3.12: Mapa lokality Jestřebice, upraveno podle mapy.cz.

4. Metodika práce

4.1. Metodika loužení solí

4.1.1. Metodika loužení solí – práce v laboratoři

Na studovaných lokalitách byly vzorky seškrábány z několika milimetrů mocné přípovrchové zóny nožem, případně odvrtny vidiovým vrtákem o průměru 10 mm. Tyto vzorky jsem následně loužila za účelem získání složení solí. Na lokalitách v ČR jsem se podílela na odběru vzorků, na zahraničních lokalitách byly vzorky odebírány kolegy, především J. Bruthansem a M. Filippim. Odběr vzorků měl pro každou lokalitu určitá specifika, která uvádím v následující kapitole 5. Výsledky loužení solí.

Pracovala jsem se vzorky hornin vysušenými za pokojové teploty 25 °C a relativní vlhkosti cca 50 %. Vysušené vzorky jsem rozdružila malým kladivem na jednotlivá zrna a následně kvartovala, tak, abych získala reprezentativní vzorek o hmotnosti 2 – 4 g. K vážení vzorků jsem používala váhu Voltcraft PS – 500 C s přesností 0,05 g a rozsahem vážení do 500 g. Rozdružený vzorek jsem nasypala do destilovanou vodou vypláchnutých PET lahví o objemu 0,5 l a zalila destilovanou vodou v poměru 1 g suchého pískovce na 100 ml destilované vody. Pro kontrolu čistoty vzorkovnice a filtrace jsem během každého loužení udělala tzv. blank – vzorek bez pevné fáze, pouze s destilovanou vodou používanou k loužení. Zalité vzorky jsem umístila na třepací přístroj a nechala je zde třepat při 150 otáčkách za minutu po dobu 12 hodin. Po ukončení třepání (v některých případech i ihned po zalití vzorku destilovanou vodou) jsem změřila konduktivitu jednotlivých výluhů přístrojem WTW se sondou TetraCon. Pro kontrolu, zda byla doba loužení dostatečná pro rozpuštění všech solí, jsem konduktivitu některých vzorků po několika měsících znovu přeměřila. Na základě hodnot konduktivity jsem vybrala reprezentativní vzorky, se kterými jsem dále pracovala. Přednostně jsem vybrala vzorky s vyšší konduktivitou a mezi ně jsem zařadila i několik vzorků s nízkou konduktivitou, aby bylo analyzováno celé spektrum vzorků vody. Vybrané výluhy jsem filtrovala pomocí membránových filtrů Millipore o velikosti pórů 0,45 µm. Přefiltrované vzorky jsem uložila v chladu v HDPE vzorkovnicích a následně převezla do Geologického ústavu AV ČR, kde bylo chemické složení výluhů analyzováno J. Rohovcem a Š. Matouškovou.

Stanovení aniontů bylo provedeno pomocí HPLC – high performance liquid chromatography (Dionex ICS-2000) a kationtů pomocí ICP OES – inductively coupled plasma optical emission spektrometry (Thermo Scientific). Množství síranů bylo vypočteno

z koncentrace síry naměřené pomocí ICP OES. Chloridy byly v některých případech stanoveny argentometricky. Tyto výsledky byly uvedeny v jednotkách ppm. Anorganický uhlík (IC) byl stanoven okyslením vzorku na přístroji pro stanovení TOC, typu Shimadzu TOC V/CPH a jeho koncentrace byly uvedeny v mg uhlíku na 1 l vzorku. Amonný kationt v jednotkách mg/l byl stanoven technikou UV VIS (J. Rohovec 2017 – písemné sdělení). Výsledky chemických analýz všech loužených vzorků jsou uvedeny v Příloze 2. (tabulky 10.1 – 10.6).

4.2. Metodika loužení solí – postup zpracování výsledků chemických analýz

U analyzovaných vzorků jsem z výsledků chemických analýz vypočítala celkovou mineralizaci všech loužených vzorků a určila zastoupení jednotlivých solí ve vzorku v hmotnostních procentech. Celkovou mineralizaci všech vzorků jsem vypočítala z naměřených hodnot konduktivity na základě regrese s celkovou mineralizací analyzovaných výluhů. U chemických rozborů jsem provedla kontrolu analýzy pomocí výpočtu nábojové bilance. U všech vzorků jsem odečetla koncentrace jednotlivých iontů naměřených v blank vzorku. Pro další postup jsem převedla hmotnostní koncentrace na molární vydělením stanovené koncentrace daného prvku relativní atomovou hmotností. Na základě hodnot Pearsonova korelačního koeficientu (R) mezi stanovenými ionty, znalosti rešeršních údajů o zastoupení minerálů na jednotlivých lokalitách a rovnovážných relativních vlhkostí pro dané minerály, jsem postupně vypočítala zastoupení jednotlivých solí. Pomocí funkce v excelu jsem u každé soli zjistila, který prvek je limitující pro srážení daného minerálu a z jeho molární koncentrace jsem pak vypočítala koncentraci daného minerálu v mg/l. Vydělením hmotnostní koncentrace celkovou mineralizací daného výluhu jsem získala procentuální zastoupení soli v daném vzorku. Pro výpočet koncentrací dalších minerálů jsem počítala pouze s množstvím daného prvku, které nebylo použito pro výpočet koncentrace předchozího minerálu. V některých případech jsem počítala s různými variantami a pořadím srážení solí. Pořadí solí jsem volila na základě znalostí o vlastnostech jednotlivých solí. Podrobný postup výpočtu zastoupení solí je uveden v následující kapitole 5. Výsledky loužení solí u každé studované oblasti zvlášť. Ve výsledcích uvádím hmotnostní procenta obsahu solí vůči celkové pevné fázi a zastoupení jednotlivých solí v hmotnostních procentech vůči celkovému obsahu solí v daném výluhu.

4.3. Metodika fyzikálního modelování transportu roztoku a výparových zón

Na odvrtných jádrech hruboskalského pískovce z lokality Jestřebice (Kokořínsko), které jsem měla k dispozici v laboratoři, jsem pomocí pilníku vytvořila umělé voštiny. Jádra jsem umístila do PVC (polyvinylchloridových) zátek a upravila pilníkem tak, aby přesně zapadala do zátky, čímž jsem zabránila výparu do stran. Mezi zadní stěnu zátky a vzorek jsem vložila pruh savé bavlněné látky (dětské pleny) o šířce 3,5 cm, který byl prostrčen otvorem v zátce do PVC trubky s roztokem fluoresceinu a umožňoval tak kapilární vztlínání roztoku do vzorku. Pro přípravu roztoku fluoresceinu jsem použila barvivo fluorescein sodný (uranin) od firmy Lach-Ner, s.r.o. Chemický vzorec této látky je $C_{20}H_{10}Na_2O_5$. Produkt má podobu červenooranžového prášku. Barva roztoku fluoresceinu se mění v závislosti na rostoucí koncentraci od slabě zelené přes žlutou až po červenou (Käss 1998). Já jsem pracovala s roztokem o koncentraci 3 g prášku na 1 l destilované vody, který měl tmavě oranžovou barvu. Roztok jsem nalila do PVC trubky s průhlednou gumovou hadičkou a metrem, určeným ke sledování hladiny roztoku v trubce v průběhu experimentu. PVC trubku jsem k zátce připevnila elektrikařskou páskou a vzorek zavěsila, tak, aby vnější strana jádra s voštinou byla ve vertikální poloze. Spodní stranu vzorku jsem označila lihovým fixem, aby byl vzorek po manipulaci vrácen vždy do stejné polohy. Jádra jsem v průběhu experimentu fotila ze všech stran a vážila na váze Voltcraft PS 500 C s přesností 0,05 g a rozsahem vážení do 500 g. Závěsná aparatura s probíhajícím pokusem je vyfocena na obrázku 4.1. Všechny pokusy, které uvádím ve výsledcích, byly provedeny v jedné místnosti na totožném místě, probíhaly tedy za stejných podmínek teploty a relativní vlhkosti okolo 50 %.



Obrázek 4.1: Závěsná aparatura pro modelování transportu roztoku.

5. Výsledky loužení solí

5.1. Přehled výsledků loužení solí

5.1.1. Lokality v Českém ráji, Česká republika

Na studovaných lokalitách v Českém ráji proběhl odběr vzorků v červnu 2016. Na těchto lokalitách jsme se zaměřili na obsah solí v jednotlivých voštinách. Pro porovnání rozdílu mezi obsahem solí na hřebíčcích a v důlcích voštin jsme vzorky odebírali v párech, vždy jeden vzorek z hřebítku a druhý z důlku téže voštiny. Bylo odebráno 5 – 10 párů vzorků na každé lokalitě (celkem 30 párů). Z 60 výluhů jsem nechala analyzovat 41 vzorků. V následujících tabulkách 5.1 až 5.5 uvádím seznamy vzorků (písmeno H označuje hřebítek dané voštiny, písmeno D důlek dané voštiny), hodnoty konduktivity, hodnoty celkové mineralizace (TDS) analyzovaných výluhů a celkové mineralizace všech vzorků dopočítané pomocí regrese a dále hmotnostní procenta celkového obsahu solí vůči celkové pevné fázi na pěti studovaných lokalitách v Českém ráji a okolí.

Tabulka 5.1: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Mladějov 1; H - hřebítek, D - důlek.

název vzorku	konduktivita [μS/cm] po 12 h loužení	TDS [mg/l] analyzovaných vzorků	TDS [mg/l] dopočítaná pomocí regrese	hm. % solí
H1 Mladějov 1	16	-	10	0,10
D1 Mladějov 1	6	-	4	0,04
H2 Mladějov 1	42	22	26	0,26
D2 Mladějov 1	15	7	10	0,10
H3 Mladějov 1	47	28	29	0,29
D3 Mladějov 1	8	-	5	0,05
H4 Mladějov 1	13	-	8	0,08
D4 Mladějov 1	9	-	6	0,06
H5 Mladějov 1	12	-	7	0,07
D5 Mladějov 1	7	-	4	0,04
H6 Mladějov 1	136	91	85	0,85
D6 Mladějov 1	45	26	28	0,28
H7 Mladějov 1	67	39	42	0,42
D7 Mladějov 1	37	21	23	0,23
H8 Mladějov 1	43	25	27	0,27
D8 Mladějov 1	9	-	6	0,06
H9 Mladějov 1	27	15	17	0,17
D9 Mladějov 1	14	-	8	0,08
H10 Mladějov 1	59	39	37	0,37
D10 Mladějov 1	12	-	7	0,07

Tabulka 5.2: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Mladějov 2; H - hřbítek, D - důlek.

název vzorku	konduktivita [μS/cm] po 12 h loužení	TDS [mg/l] analyzovaných vzorků	TDS [mg/l] dopočítaná pomocí regrese	hm. % solí
H11 Mladějov 2	11	-	7	0,07
D11 Mladějov 2	4	-	3	0,03
H12 Mladějov 2	20	11	12	0,12
D12 Mladějov 2	8	-	5	0,05
H13 Mladějov 2	16	9	10	0,10
D13 Mladějov 2	23	15	14	0,14
H14 Mladějov 2	7	-	4	0,04
D14 Mladějov 2	20	12	12	0,12
H15 Mladějov 2	17	9	11	0,11
D15 Mladějov 2	36	23	23	0,23

Tabulka 5.3: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Malobratřice; H - hřbítek, D - důlek .

název vzorku	konduktivita [μS/cm] po 12h loužení	TDS [mg/l] analyzovaných vzorků	TDS [mg/l] dopočítaná pomocí regrese	hm. % solí
H16 Malobratřice	26	15	17	0,17
D16 Malobratřice	37	23	23	0,23
H17 Malobratřice	81	51	51	0,51
D17 Malobratřice	32	19	20	0,20
H18 Malobratřice	36	22	23	0,23
D18 Malobratřice	15	-	9	0,09
H19 Malobratřice	12	-	8	0,08
D19 Malobratřice	19	10	12	0,12
H20 Malobratřice	29	16	18	0,18
D20 Malobratřice	8	-	5	0,05

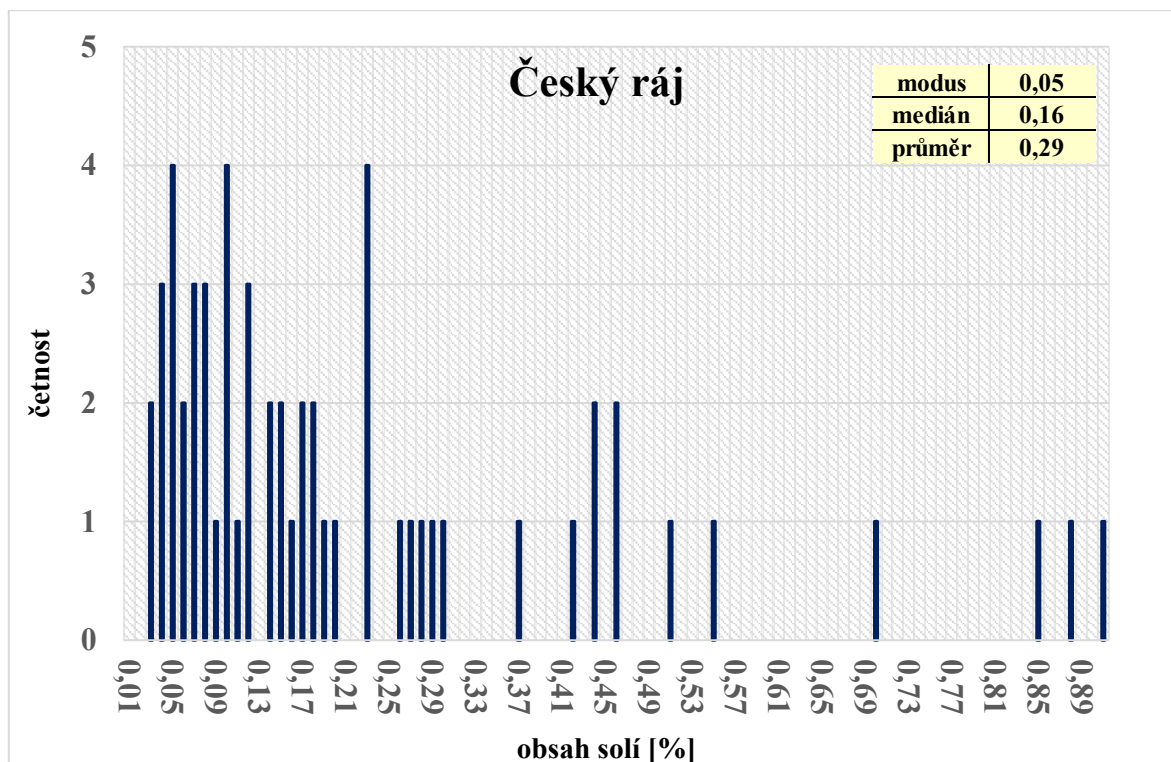
Tabulka 5.4: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Radvánovice; H - hřbítek, D - důlek.

název vzorku	konduktivita [μS/cm] po 12 h loužení	TDS [mg/l] analyzovaných vzorků	TDS [mg/l] dopočítaná pomocí regrese	hm. % solí
H21 Radvánovice	74	42	46	0,46
D21 Radvánovice	111	67	70	0,70
H22 Radvánovice	141	91	88	0,88
D22 Radvánovice	8	-	5	0,05
H23 Radvánovice	71	44	44	0,44
D23 Radvánovice	70	38	44	0,44
H24 Radvánovice	88	49	55	0,55
D24 Radvánovice	17	4	10	0,10
H25 Radvánovice	30	13	19	0,19
D25 Radvánovice	22	13	14	0,14

Tabulka 5.5: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Drábovna; H - hřbítek, D - důlek.

název vzorku	konduktivita [μS/cm] po 12 h loužení	TDS [mg/l] analyzovaných vzorků	TDS [mg/l] dopočítaná pomocí regrese	hm. % solí
H26 Drábovna	176	117	110	1,10
D26 Drábovna	481	411	301	3,01
H27 Drábovna	29	19	18	0,18
D27 Drábovna	4	-	3	0,03
H28 Drábovna	26	14	16	0,16
D28 Drábovna	24	14	15	0,15
H29 Drábovna	74	43	46	0,46
D29 Drábovna	47	27	30	0,30
H30 Drábovna	145	97	91	0,91
D30 Drábovna	23	9	15	0,15

Obsah solí na lokalitách s voštinami v Českém ráji a okolí se pohybuje se mezi 0,03 až 3,01 hm. % (0,29 hm. % v průměru). Četnost koncentrací solí je znázorněna na grafu na obrázku 5.1. Z grafu jsem vyloučila odlehlé hodnoty vzorků H26 (1,10 hm. %) a D26 (3,01 hm. %) z lokality Drábovna.



Obrázek 5.1: Četnosti obsahu solí na lokalitách Českém ráji a okolí.

V tabulce 5.6 jsou uvedeny střední hodnoty (medián) a průměrné hodnoty koncentrací jednotlivých iontů a dále střední a průměrná hodnota celkové mineralizace (TDS) v jednotkách ppm vypočtené z výsledků analýz vzorků odebraných na lokalitách v Českém ráji a okolí. Dále je v tabulce uvedeno průměrné procentuální zastoupení daných iontů z celkového množství kationtů nebo aniontů.

Tabulka 5.6: Hodnoty průměrných koncentrací a mediánů koncentrací iontů na lokalitách v Českém ráji a okolí.

	MEDIÁN [ppm]	PRŮMĚR [ppm]	% zastoupení kationtů nebo aniontů
Al	16	130	16%
Ca	278	395	48%
Fe	9	25	3%
K	100	187	23%
Mg	13	21	3%
Mn	13	30	4%
Na	16	24	3%
Sr	2	2	0%
Cu	2	9	1%
Si	4	5	-
anorg C	6	6	-
SO₄	1128	2206	89%
Cl	97	96	4%
NO₃	106	166	7%
PO₄	6	8	0%
TDS	1796	3313	-

Na základě hodnot Pearsonova korelačního koeficientu (R) byla pozorována úzká korelace mezi sírany a hliníkem ($R = 0,79$), sírany a draslíkem ($R = 0,71$), mezi sírany a vápníkem ($R = 0,68$) a také mezi sírany s hořčíkem a sodíkem ($R = 0,74$ a $R = 0,66$). Hodnoty korelačních koeficientů pro jednotlivé ionty jsou uvedeny v tabulce 5.7. Hodnoty $R \geq 0,5$ jsou v tabulce vyznačeny tučně. Hodnoty korelačních koeficientů pro soli vyskytující se na základě mých výpočtů na dané lokalitě jsou vyznačeny tučně a červeně. Z výpočtu korelačních koeficientů jsem vyřadila vzorek D26 z lokality Drábovna s extrémně vysokými koncentracemi sledovaných iontů.

Tabulka 5.7: Korelace stanovených iontů na lokalitách v Českém ráji a okolí.

Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Si	Sr	Cu	SO ₄	Cl	NO ₃	PO ₄	
0,11	0,18	0,82	0,40	0,40	0,62	-0,28	0,34	0,11	0,79	0,01	0,39	0,01	Al
x	0,33	0,22	0,63	0,53	0,31	-0,11	0,80	0,46	0,68	-0,18	0,49	0,34	Ca
-	x	0,00	0,27	0,14	0,25	-0,15	0,49	0,67	0,39	-0,29	0,04	-0,16	Fe
-	-	x	0,33	0,29	0,68	-0,27	0,37	0,01	0,71	0,17	0,60	0,18	K
-	-	-	x	0,96	0,63	-0,27	0,70	0,35	0,74	-0,24	0,55	0,43	Mg
-	-	-	-	x	0,57	-0,23	0,63	0,21	0,68	-0,23	0,44	0,42	Mn
-	-	-	-	-	x	-0,27	0,47	0,35	0,66	0,19	0,60	0,18	Na
-	-	-	-	-	-	x	-0,16	-0,10	-0,29	0,07	-0,37	-0,01	Si
-	-	-	-	-	-	-	x	0,41	0,76	-0,28	0,47	0,23	Sr
-	-	-	-	-	-	-	-	x	0,39	-0,09	0,11	-0,09	Cu
-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-0,17	0,57	0,24	SO ₄
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	0,14	-0,19	Cl
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	0,29	NO ₃

Na základě těchto korelací a rešeršních údajů byly vypočítány obsahy jednotlivých solí. Nejdříve jsem vypočítala zastoupení sádrovce jako nejméně rozpustného minerálu. Zastoupení dalších síranových minerálů jsem počítala pouze s množstvím síranů, které zbylo po vysrážení předchozího minerálu. Pořadí, které jsem volila pro srážení síranových minerálů, odpovídá pořadí vzorků v tabulce 5.8 (zleva doprava). Zastoupení minerálu nitrokalitu jsem počítala s množstvím draslíku zbylého po vysrážení draselného alumu.

Tabulka 5.8: Zastoupení jednotlivých solí na lokalitách v Českém ráji a okolí.

název vzorku	CaSO ₄ hm. %	KAl(SO ₄) ₂ hm. %	MgSO ₄ hm. %	Na ₂ SO ₄ hm. %	KNO ₃ hm. %	suma solí hm. %
H2 Mladějov 1	19%	24%	4%	8%	0%	54%
D2 Mladějov 1	48%	5%	1%	4%	1%	59%
H3 Mladějov 1	39%	13%	2%	6%	8%	68%
H6 Mladějov 1	46%	11%	4%	2%	0%	63%
D6 Mladějov 1	51%	11%	2%	2%	0%	66%
H7 Mladějov 1	36%	25%	5%	3%	6%	75%
D7 Mladějov 1	48%	8%	4%	3%	7%	71%
H8 Mladějov 1	44%	5%	3%	3%	13%	68%
H9 Mladějov 1	46%	5%	2%	3%	10%	65%
H10 Mladějov 1	62%	1%	1%	2%	6%	72%
H12 Mladějov 2	44%	3%	3%	5%	0%	54%
H13 Mladějov 2	24%	5%	10%	8%	0%	48%
D13 Mladějov 2	60%	1%	1%	1%	0%	63%
D14 Mladějov 2	61%	2%	1%	2%	0%	66%
H15 Mladějov 2	17%	7%	10%	9%	0%	44%
D15 Mladějov 2	65%	1%	1%	1%	0%	69%
H16 Malobratřice	51%	6%	3%	3%	6%	69%
D16 Malobratřice	61%	2%	2%	3%	5%	73%
H17 Malobratřice	59%	3%	3%	1%	7%	73%
D17 Malobratřice	67%	2%	2%	1%	0%	71%
H18 Malobratřice	58%	3%	3%	2%	6%	72%
D19 Malobratřice	56%	4%	1%	3%	0%	64%
H20 Malobratřice	1%	13%	6%	4%	9%	33%
H21 Radvánovice	22%	21%	7%	2%	8%	59%
D21 Radvánovice	14%	24%	2%	1%	0%	40%
H22 Radvánovice	48%	6%	5%	1%	7%	67%
H23 Radvánovice	47%	2%	5%	2%	12%	67%
D23 Radvánovice	10%	25%	1%	1%	0%	35%
H24 Radvánovice	24%	13%	4%	2%	0%	42%
D24 Radvánovice	13%	28%	6%	7%	0%	54%
H25 Radvánovice	1%	20%	7%	4%	0%	31%
D25 Radvánovice	54%	2%	1%	2%	2%	61%
H26 Drábovna	10%	58%	1%	2%	2%	73%
D26 Drábovna	23%	37%	0%	0%	0%	60%
H27 Drábovna	59%	2%	1%	2%	0%	63%
H28 Drábovna	43%	11%	3%	3%	0%	60%
D28 Drábovna	53%	2%	1%	2%	0%	58%
H29 Drábovna	20%	35%	4%	4%	8%	71%
D29 Drábovna	46%	11%	2%	3%	8%	71%
H30 Drábovna	26%	13%	8%	2%	0%	49%
D30 Drábovna	10%	25%	8%	4%	0%	47%
PRŮMĚR	39%	12%	3%	3%	3%	60%

Na základě mých výpočtů je zde sádrovec nejrozšířenější solí (s průměrným obsahem 39 hm. % z celkového obsahu solí v daném výluhu), následován draselným alumem ($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$) s průměrným obsahem 12 hm. %. Dalšími možnými minerály jsou epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), thenardit (Na_2SO_4) a nitrokalit (KNO_3), všechny s průměrným zastoupením 3 hm. %. Vysoké hodnoty korelačních koeficientů vychází dobře i pro minerál nitronatrit, koncentrace sodíku jsou však pro vznik tohoto minerálu příliš nízké.

Pro porovnání rozdílu v obsahu solí mezi hřebítky a důlky voštin jsem koncentrace celkového obsahu solí (celkové mineralizace) na hřebítcích dělila koncentrací solí v důlcích dané voštiny. Hodnoty poměrů pro všech 30 párů vzorků odebíraných na lokalitách v Českém ráji a okolí jsou uvedeny v tabulce 5.9. Poměr celkového množství rozpuštěných solí mezi hřebítky a důlky je ve většině případů větší než 1 (medián těchto hodnot je roven 2,3) což znamená, že bylo stanoveno více solí na hřebítcích jednotlivých voštin. Větší množství solí se pravděpodobně akumuluje v důlcích voštin, díky solnému zvětrávání však dochází k opadu tohoto materiálu.

Tabulka 5.9: Hodnoty poměrů celkové mineralizace mezi hřebítky a důlky jednotlivých voštin na lokalitách v Českém ráji a okolí.

názvy vzorků	H1/D1	H2/D2	H3/D3	H4/D4	H5/D5	H6/D6	H7/D7	H8/D8	H9/D9	H10/D10
poměr TDS	2,5	2,7	5,7	1,4	1,7	3,0	1,8	4,8	2,0	5,1
názvy vzorků	H11/D11	H12/D12	H13/D13	H14/D14	H15/D15	H16/D16	H17/D17	H18/D18	H19/D19	H20/D20
poměr TDS	2,5	2,5	0,7	0,3	0,5	0,7	2,6	2,5	0,6	3,6
názvy vzorků	H21/D21	H22/D22	H23/D23	H24/D24	H25/D25	H26/D26	H27/D27	H28/D28	H29/D29	H30/D30
poměr TDS	0,7	17,8	1,0	5,3	1,4	0,4	6,8	1,1	1,6	6,3

5.1.2. Lokality na Dvořákově stezce, Česká republika

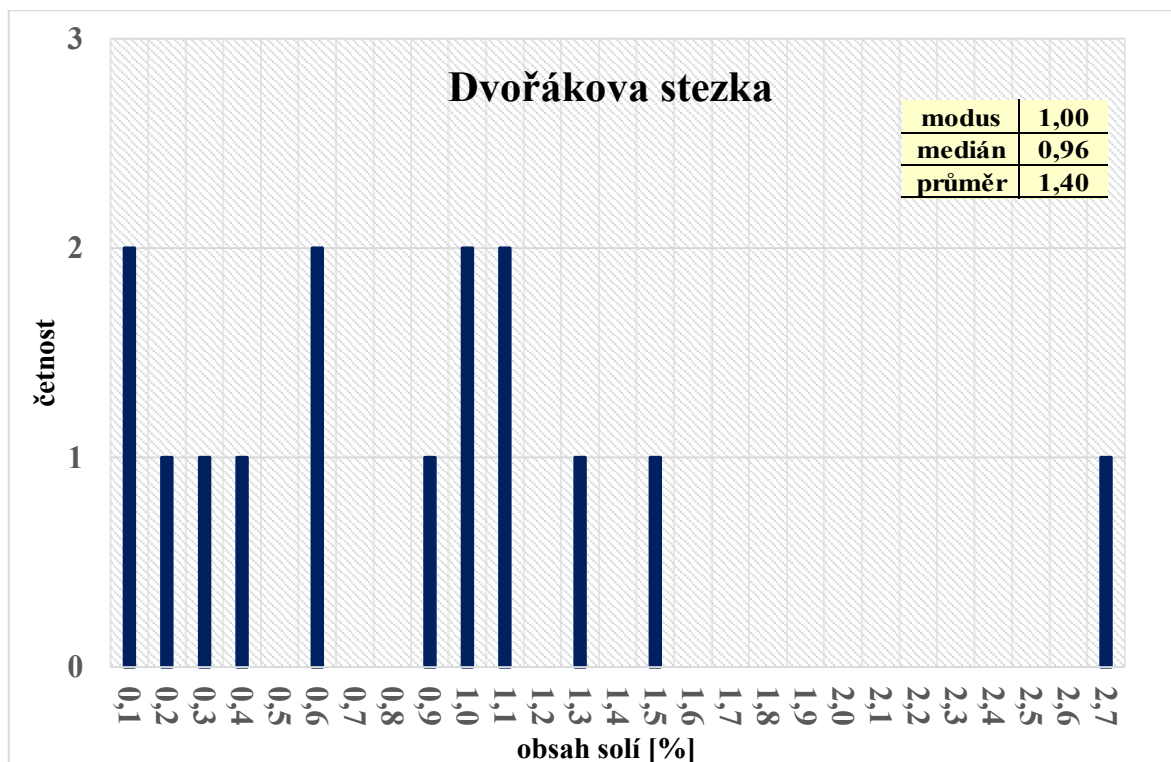
Odběr vzorků z tafoni na Dvořákově stezce u Kralup nad Vltavou proběhl dne 23. 9. 2015. Vzorky K1 – K10 byly odebrány na lokalitě 2, vzorky K11 – K16 na lokalitě 1. Během odběru vzorků bylo zaznamenáno, zda se jedná o vnitřek nebo vnějšek (vizor) tafone, aby bylo možné porovnat případný rozdíl ve výskytu solí na těchto částech tafone. V tabulce 5.10 je uveden seznam vzorků, hodnoty konduktivity měřené po

12 hodinách loužení, vypočtená celková mineralizace a váhová procenta obsahu solí. Z 16 výluhů jsem nechala analyzovat 13 vzorků.

Tabulka 5.10: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokalit na Dvořákově stezce.

název vzorku	místo a hloubka odběru vzorku v cm	konduktivita [μS/cm] měřená po 12 h loužení	TDS [mg/l] analyzovaných vzorků	TDS [mg/l] dopočítaná pomocí regrese	hm. % solí
K1	vnitřek, 0 - 2	160	88	97	0,97
K2	vizor, 0 - 2	39	17	24	0,24
K3	vnitřek, 0 - 2	105	58	64	0,64
K4	vizor, 0 - 2	59	-	36	0,36
K5	vizor, 0 - 2	166	89	101	1,01
K6	vnitřek, 0 - 0,5	1531	1331	932	9,32
K7	vnitřek, 0,5 - 2	156	89	95	0,95
K8	vnitřek, 0 - 2	44	-	27	0,27
K9	vizor, 0 - 2	17	-	10	0,10
K10	vnitřek, 0 - 2	104	55	63	0,63
K11	vnitřek, 0 - 2	187	108	114	1,14
K12	vizor, 0 - 2	221	107	134	1,34
K13	vnitřek, 0 - 2	173	107	105	1,05
K14	hranice vnitřek/vizor, 0 - 2	443	303	270	2,70
K15	vnitřek, 0 - 2	253	148	154	1,54
K16	vizor, 0 - 2	23	13	14	0,14

Obsah solí se pohybuje mezi 0,14 až 9,32 hm. % (1,40 hm. % v průměru). Četnost jednotlivých koncentrací solí je znázorněna na grafu na obrázku 5.2. Maximální hodnota (9,32 hm. %) odpovídá vzorku K6, který jsem pro jeho odlehlou hodnotu vyloučila z grafu četností obsahu solí.



Obrázek 5.2: Četnosti obsahu solí na lokalitách na Dvořákově stezce.

V tabulce 5.11 jsou uvedeny střední hodnoty (medián) a průměrné hodnoty koncentrací jednotlivých iontů a dále střední a průměrná hodnota celkové mineralizace (TDS) v jednotkách ppm vypočtené z výsledků analýz vzorků odebraných na Dvořákově stezce. Dále je v tabulce uvedeno průměrné procentuální zastoupení daných iontů z celkového množství kationtů nebo aniontů.

Tabulka 5.11: Hodnoty průměrných koncentrací a mediánů koncentrací iontů na lokalitách na Dvořákově stezce.

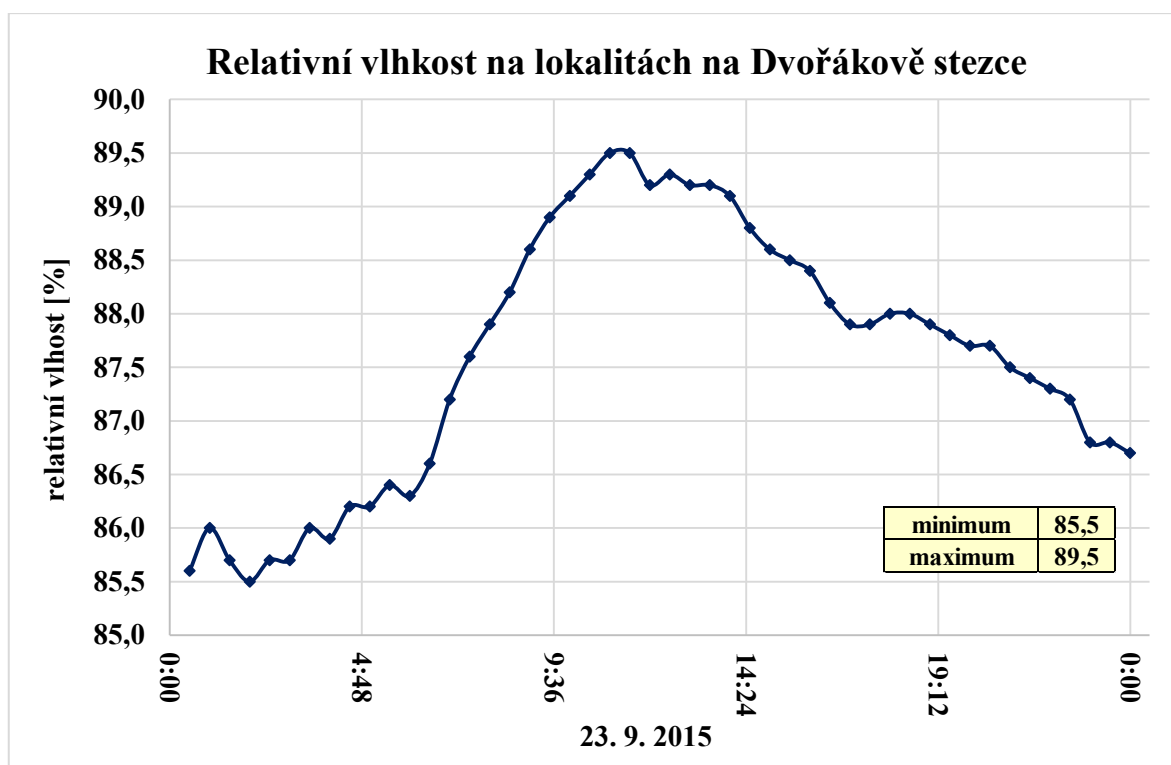
	MEDIÁN [ppm]	PRŮMĚR [ppm]	% zastoupení kationtů nebo aniontů
Al	5	6	0%
Ca	232	3435	65%
Fe	9	11	0%
K	330	412	8%
Mg	1008	939	18%
Mn	1	2	0%
Na	164	264	5%
Si	87	86	-
anorg C	63	77	-
SO₄	5355	12127	90%
Cl	650	693	5%
NO₃	230	299	2%
TDS	8134	18351	-

V tabulce 5.12 jsou uvedeny korelační koeficienty pro jednotlivé ionty. Hodnoty $R \geq 0,5$ jsou v tabulce vyznačeny tučně, hodnoty korelačních koeficientů pro soli předpokládané na základě mých výpočtů na lokalitách na Dvořákově stezce jsou vyznačeny červeně. Z výpočtu korelačních koeficientů jsem vyřadila vzorek K6 s extrémně vysokými hodnotami a vzorek K16 s extrémně nízkými hodnotami celkové mineralizace. Byla pozorována velmi úzká korelace mezi sírany a vápníkem ($R = 0,91$). Korelační koeficient pro minerály síranu hořečnatého (epsomit a hexahydrit) detekovaných na této lokalitě M. Filippim pomocí XRD neukazuje na žádnou korelaci mezi těmito ionty ($R = 0,29$). To může být způsobeno přítomností sádrovce, díky kterému se sírany sráží jak s ionty vápníku, tak hořčíku. Když jsem vzala v úvahu tuto skutečnost a vypočítala jsem korelační koeficient pro sumu vápníku a hořčíku se sírany, je již pozorovatelná velmi těsná korelace mezi těmito ionty ($R = 0,98$). Dalším možným minerálem je polyhalit (kombinace iontů vápníku, hořčíku a draslíku se sírany), pro nějž vychází korelační koeficient $R = 0,98$ nebo minerál syngenit (kombinace iontů vápníku a draslíku se sírany), pro který vychází $R = 0,92$. Korelační koeficient mezi ionty draslíku a sodíku s chloridy ukazuje na možnou přítomnost sylvinu a halitu.

Tabulka 5.12: Korelace stanovených iontů na lokalitách na Dvořákově stezce.

Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Si	C	SO ₄	Cl	NO ₃	
0,12	0,09	0,35	0,30	-0,11	0,21	0,27	0,21	0,21	0,43	0,55	Al
x	0,28	0,28	-0,13	-0,19	0,09	0,06	0,42	0,91	0,15	0,36	Ca
-	x	-0,15	-0,55	-0,19	-0,22	-0,05	-0,17	0,08	0,25	-0,15	Fe
-	-	x	0,33	-0,02	0,96	-0,22	-0,03	0,42	0,94	0,43	K
-	-	-	x	-0,32	0,34	-0,12	0,23	0,29	0,29	0,36	Mg
-	-	-	-	x	-0,04	-0,09	0,23	-0,35	0,17	-0,04	Mn
-	-	-	-	-	x	-0,35	-0,13	0,25	0,92	0,29	Na
-	-	-	-	-	-	x	0,22	0,00	-0,39	-0,27	Si
-	-	-	-	-	-	-	x	0,44	0,05	-0,11	C
-	-	-	-	-	-	-	-	x	0,26	0,50	SO₄
-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	0,47	Cl

Vypočtené zastoupení solí ve studovaných vzorcích uvádím v tabulce 5.13. Z výpočtu obsahu solí jsem vyřadila vzorek K16 s nízkou hodnotou celkové mineralizace. Nejdříve jsem vypočítala zastoupení sádrovce jako nejméně rozpustného minerálu, pro nějž je limitující množství vápníku. Ze zbývajících množství síranů jsem vypočítala zastoupení síranu hořečnatého. Pro jeho srážení je limitující jak množství hořčíku, tak i síranů. Ve svých výpočtech již nezahrnuji minerály polyhalit a syngenit, které se pravděpodobně budou také tvořit, jelikož je ve vzorcích stanoveno i dostatečné množství draslíku. Množství sylvinu (KCl) jsem počítala z celkové koncentrace draslíku, takže uvedené množství KCl je maximální možné. Ve většině případů je pro vznik sylvinu limitující množství draslíku, takže předpokládám, že draslík se vyčerpá na síranové minerály a sylvin se již nebude ve významném množství tvořit. O jeho výskytu nevypovídají ani naměřené hodnoty rovnovážné relativní vlhkosti ze dne odběru vzorků naměřené čidlem pro měření RH vynesené na grafu na obrázku 5.3. Na grafu je vidět, že hodnota RH v den odběru vzorku neklesá pod kritickou hodnotu (85,1 %) nutnou pro srážení tohoto minerálu. Tento minerál se však může vyskytovat v rozpuštěné formě a krystalizovat v horkých letních měsících, kdy hodnoty relativní vlhkosti klesají až k 45 %. V tomto období může docházet i ke krystalizaci halitu.



Obrázek 5.3: Naměřené hodnoty rovnovážné relativní vlhkosti na Dvořákově stezce ze dne 23. 9. 2015.

Tabulka 5.13: Zastoupení jednotlivých solí na lokalitách na Dvořákově stezce.

název vzorku	místo odběru vzorku	MgSO ₄ hm. %	CaSO ₄ hm. %	KCl hm. %	suma solí hm. %
K01	vnitřek	62%	6%	4%	73%
K02	vizor	10%	21%	0%	31%
K03	vnitřek	13%	57%	4%	74%
K05	vizor	56%	7%	7%	70%
K06	vnitřek	3%	76%	0%	79%
K07	vnitřek	59%	7%	6%	72%
K10	vnitřek	61%	11%	4%	76%
K11	vnitřek	57%	15%	4%	75%
K12	vizor	48%	3%	17%	68%
K13	vnitřek	32%	36%	7%	75%
K14	hranice	12%	59%	4%	76%
K15	vnitřek	42%	16%	9%	67%
PRŮMĚR		38%	26%	6%	70%

Na základě vypočtených obsahů solí z analyzovaných výluhů je nejvíce zastoupeným minerálem epsomit s 38 hm. %, následován sádrovcem s 26 hm. % v průměru. Nevylučují ani přítomnost minerálu sylvinu s maximálním průměrným relativním zastoupením 6 hm. % ve výluhu.

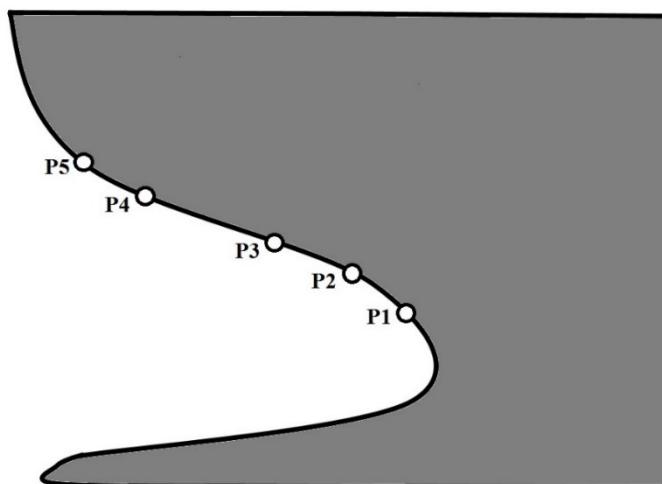
Pro porovnání rozdílu obsahu solí mezi vnějšími a vnitřními částmi tafoni jsem vypočítala poměry celkové mineralizace u jednotlivých tafone. Poměry celkového množství rozpuštěných solí mezi vizory a prohlubněmi jednotlivých tafone jsou uvedeny v tabulce 5.14. Tento poměr je ve všech případech menší než 1 (medián těchto hodnot je roven 0,38), což znamená, že se obecně více solí nachází na vnitřních stěnách jednotlivých tafone.

Tabulka 5.14: Hodnoty poměrů celkové mineralizace mezi vnějšími a vnitřními částmi jednotlivých tafone na lokalitách na Dvořákově stezce.

název vzorku	K01/K02	K03/K04	K04/K07	K09/K08	K09/K10	K13/K12	K14/K12	K15/K16
poměr TDS	0,2	0,6	0,4	0,4	0,2	0,8	0,5	0,1

5.1.3. Lokalita Čertova kazatelna, Česká republika

Na lokalitě Čertova kazatelna byly vzorky odebírány průběžně v období od října 2013 do března 2015, aby bylo možné pozorovat variabilitu obsahu solí ve studovaném převisu v průběhu všech ročních období. Ze 113 loužených vzorků jsem nechala analyzovat 23 vzorků. Při vyhodnocování jsem se zaměřila na vzorky P1 – P5 (jejichž umístění ve studovaném převisu je zobrazeno v řezu na obrázku 5.4), které byly odebírány opakovaně a zároveň bylo analyzováno jejich chemické složení. Vzorek P1 se nachází v nejhlubší části převisu, vzorek P5 na vnější části převisu, je nejvíce exponovaný a nejvýše, takže nejdříve vysychá. Analyzované vzorky P1 – P5 byly odebrány dne 28. 10. 2013, vzorek P3 a P5 byl rozdělen na dvě části I. a II.



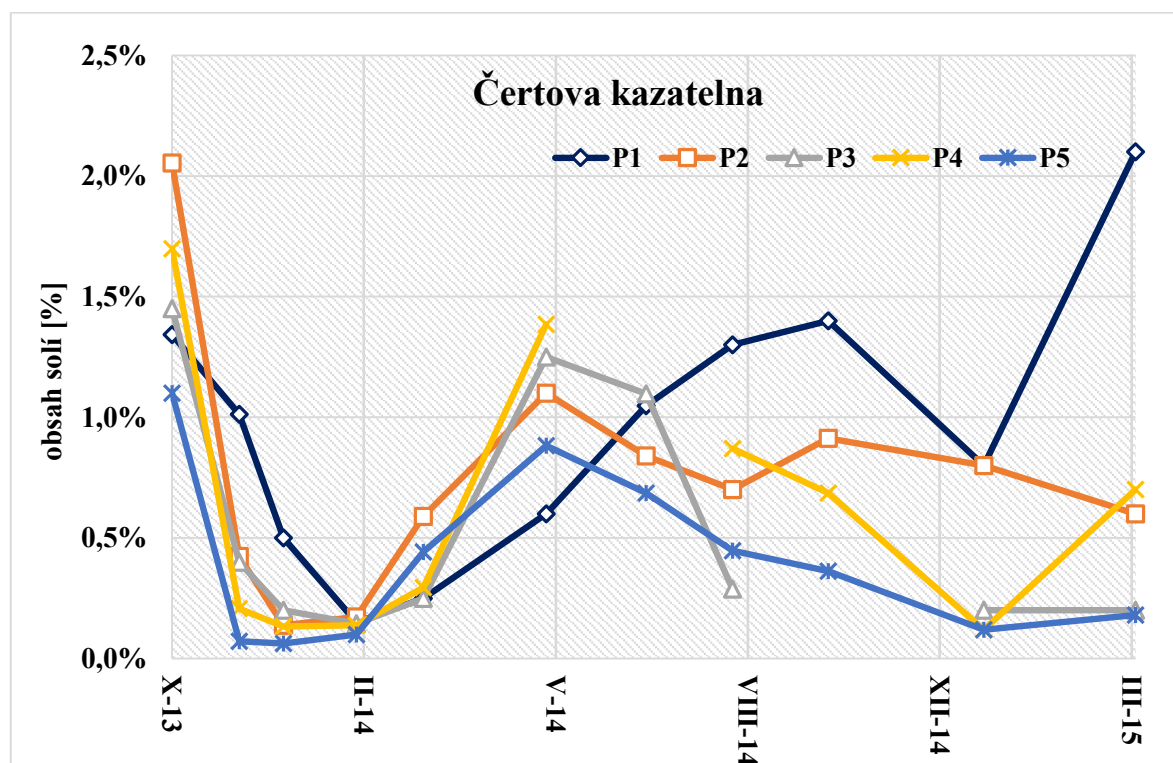
Obrázek 5.4: Schématický náčrt řezu převísem s lokalizací vzorků P1 – P5.

V tabulce 5.15 je uveden seznam vzorků, hodnoty konduktivity měřené po 12 hodinách loužení a hodnoty konduktivity měřené po několika měsících od doby loužení vzorku, vypočtená celková mineralizace a hmotnostní procenta obsahu solí. V tabulce 5.15 je vidět, že konduktivita měřená po několika měsících od doby loužení se již výrazně nemění. Pro rozpuštění většiny v destilované vodě rozpustných solí je 12 hodin loužení dostačující. Hodnoty konduktivity měřené po několika měsících jsou pouze orientační, protože u všech vzorků uvedených v tabulce 5.15 jsem část objemu vzorku odebrala na filtraci, a tím pádem nebyl ve vzorkovnicích zachován poměr 1 g vzorku na 100 ml destilované vody. Seznam všech loužených vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí pro všech 113 vzorků z lokality Čertova kazatelna jsou uvedeny v Příloze 1. (tabulka 9.1).

Tabulka 5.15: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Čertova kazatelna; (I., II. – různá místa odběru téhož vzorku).

název vzorku	datum odběru vzorku	datum loužení vzorku	konduktivita [μS/cm] měřená po 12 h loužení	konduktivita [μS/cm] měřená 26. 3. 2015	TDS [mg/l] analyzovaných vzorků	TDS [mg/l] dopočítaná pomocí regrese	hm. % solí
P1	28. 10. 13	5. 11. 14	219	230	193	143	1,43
P2	28. 10. 13	5. 11. 14	335	366	182	219	2,19
P3 I.	28. 10. 13	5. 11. 14	222	244	132	145	1,45
P3 II.	28. 10. 13	5. 11. 14	242	266	152	159	1,59
P4	28. 10. 13	5. 11. 14	277	308	144	181	1,81
P5 I.	28. 10. 13	5. 11. 14	209	218	180	137	1,37
P5 II.	28. 10. 13	5. 11. 14	129	146	93	84	0,84

Naměřený obsah solí z hloubky 0 – 5 mm výrazně kolísá během roku a ve studovaných vzorcích P1 – P5 se pohybuje od 0,1 do 2,1 hm. %. Množství solí výrazně klesá během listopadu 2013, kdy byly soli pravděpodobně rozpouštěny a vyluhovány prosakující vodou. Soli se začaly znovu akumulovat na jaře a maximální koncentrace dosáhly během léta nebo podzimu. Vzorky, které opadly z převisu během zimy, mají velmi nízký obsah solí (0,06 – 0,1 hm. %). Na grafu na obrázku 5.5 je vidět průběh celkového obsahu solí v hmotnostních procentech pro vzorky P1 – P5 během studovaného období.



Obrázek 5.5: Obsah solí v průběhu studovaného období na lokalitě Čertova kazatelna.

Průměrné hodnoty a medián koncentrací jednotlivých iontů a medián a průměrná hodnota celkové mineralizace (TDS) v jednotkách ppm pro vzorky P1 – P5 odebíraných dne 28. 10. 2013 jsou uvedeny v tabulce 5.16. Dále v tabulce uvádím průměrné procentuální zastoupení daných iontů z celkového množství kationtů nebo aniontů.

Tabulka 5.16: Hodnoty průměrných koncentrací a mediánů koncentrací iontů na lokalitě Čertova kazatelna.

	MEDIÁN [ppm]	PRŮMĚR [ppm]	% zastoupení kationtů nebo aniontů
Ca	2153	2041	62%
Fe	1	3	0%
K	46	37	1%
Mg	403	381	9%
Na	1198	1170	27%
Si	69	61	-
anorg C	232	390	-
SO₄	4293	3907	59%
Cl	782	891	13%
NO₃	1870	1831	28%
TDS	11047	10712	-

Korelace analyzovaných iontů jsem provedla pro soubor sedmi studovaných vzorků z míst P1 – P5 odebíraných dne 28. 10. 2013, pro které jsem následně počítala obsahy solí. Byla nalezena úzká korelace mezi koncentrací síranů a vápníku ($R = 0,90$), síranů a hořčíku ($R = 0,90$), chloridů a draslíku ($R = 0,71$) a chloridů a sodíku ($R = 0,64$). Z dusičnanových minerálů připadá v úvahu minerál nitrokalit ($R = 0,69$) a nitronatrit ($R = 0,55$). Všechny hodnoty korelačních koeficientů mezi stanovovanými ionty jsou uvedeny v tabulce 5.17. Hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu $R \geq 0,5$ jsou v tabulce vyznačeny tučně, hodnoty korelačních koeficientů pro soli zastoupené na základě mých výpočtů na dané lokalitě jsou vyznačeny tučně a červeně.

Tabulka 5.17: Korelace stanovených iontů na lokalitě Čertova kazatelna.

Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Si	C	SO ₄	Cl	NO ₃	
-0,34	0,47	-0,54	-0,47	-0,01	-0,20	-0,40	0,51	-0,41	-0,80	-0,72	Al
x	-0,31	0,06	0,75	0,20	-0,27	0,78	0,30	0,90	-0,16	0,33	Ca
-	x	0,23	-0,26	-0,29	0,66	0,19	0,30	-0,34	-0,02	-0,01	Fe
-	-	x	0,04	-0,57	0,85	0,34	-0,27	0,13	0,71	0,69	K
-	-	-	x	0,60	-0,14	0,64	-0,25	0,90	0,21	0,67	Mg
-	-	-	-	x	-0,51	-0,03	-0,16	0,31	-0,12	0,14	Mn
-	-	-	-	-	x	0,22	-0,23	-0,18	0,64	0,55	Na
-	-	-	-	-	-	x	0,27	0,68	0,17	0,49	Si
-	-	-	-	-	-	-	x	-0,09	-0,71	-0,58	C
-	-	-	-	-	-	-	-	x	0,03	0,56	SO₄
-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	0,79	Cl

Při výpočtech obsahu solí jsem nejdříve vypočítala zastoupení sádrovce, který byl potvrzen analýzou XRD (Bruthans et al. 2017). Jelikož je pro množství sádrovce limitující množství síranů, nebudou se již po jeho vysrážení tvořit žádné další síranové minerály. Minerály halit a nitronatrit jsou stabilní za stejné rovnovážné relativní vlhkosti (75,5 a 74,5 %), proto v tabulkách 5.18 a 5.19 uvádím výsledky jak pro výpočet, ve kterém v prvním případě uvažuji srážení halitu a zastoupení nitronatritu počítám již pouze se zbývajícím množstvím sodíku (varianta a), tak i výpočet, ve kterém uvažuji opačné pořadí srážení těchto minerálů (varianta b). Pro srážení halitu je limitující množství chloridů, pro srážení nitronatritu množství dusičnanů. Vysoké hodnoty korelačních koeficientů vychází dobře i pro minerály s obsahem draslíku, jeho koncentrace jsou však nízké a proto se tyto minerály nebudou ve významném množství tvořit.

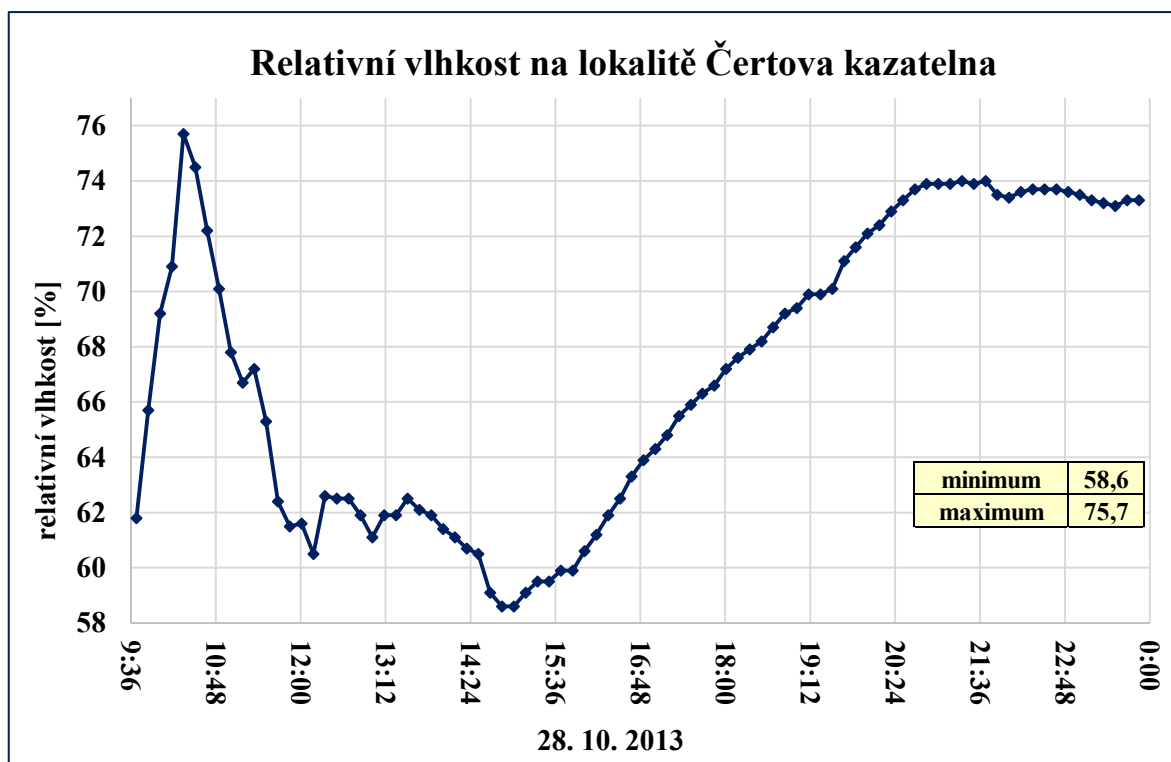
Tabulka 5.18: Souhrn zastoupení jednotlivých solí na lokalitě Čertova kazatelna – varianta a).

název vzorku	CaSO ₄ hm. %	NaCl hm. %	NaNO ₃ hm.% (po vysrážení halitu)	suma solí hm. %
P1	37%	4%	5%	47%
P2	53%	11%	10%	74%
P3 I.	24%	20%	22%	65%
P3 II.	43%	9%	18%	71%
P4	53%	14%	12%	78%
P5 I.	29%	6%	13%	49%
P5 II.	25%	13%	19%	57%
PRŮMĚR	38%	11%	14%	63%

Tabulka 5.19: Souhrn zastoupení jednotlivých solí na lokalitě Čertova kazatelna – varianta b).

název vzorku	CaSO ₄ hm. %	NaNO ₃ hm. %	NaCl hm.% (po vysrážení nitronatritu)	suma solí hm. %
P1	37%	10%	1%	48%
P2	53%	22%	3%	77%
P3 I.	24%	24%	18%	66%
P3 II.	43%	18%	9%	71%
P4	53%	21%	8%	81%
P5 I.	29%	13%	6%	49%
P5 II.	25%	19%	13%	57%
PRŮMĚR	38%	18%	8%	64%

Na základě chemického složení výluhů jsem dospěla k závěru, že hlavním minerálem na této lokalitě je sádrovec, který tvoří průměrně 38 hm. % rozpustné složky. Dále zde lze předpokládat výskyt nitronatritu (NaNO_3) s průměrným zastoupením 14 – 18 hm. % a halitu s průměrným obsahem 8 – 11 hm. %. Tyto minerály nebyly potvrzeny analýzou XRD, proto se pravděpodobně po většinu roku vyskytují pouze v rozpouštěné formě a se sráží jen při poklesu vlhkosti pod kritickou hodnotu RH. Na grafu na obrázku 5.6 je zaznamenána rovnovážná relativní vlhkost naměřená čidlem pro měření relativní vlhkosti a teploty v den odběru vzorků. Překročení rovnovážné relativní vlhkosti (při které dochází k rozpouštění) pro minerály halit (75,5 %) a nitronatrit (75,4 %) zaznamenalo čidlo v den odběru vzorků pouze okolo 10 hodiny dopolední, po zbytek dne je naměřená relativní vlhkost nižší, což potvrzuje možný výskyt těchto minerálů. Vzhledem k tomu, že studovaný převis je vystaven přímému slunečnímu svitu, mohou mít rozpustné minerály halit a nitronatrit vliv na rozpad horniny díky střídání jednotlivých cyklů rozpouštění a srážení během teplých dnů, kdy dominuje výpar, a soli krystalizují v pórech horniny.



Obrázek 5.6: Naměřené hodnoty rovnovážné relativní vlhkosti na lokalitě Čertova kazatelna ze dne 28. 10. 2013.

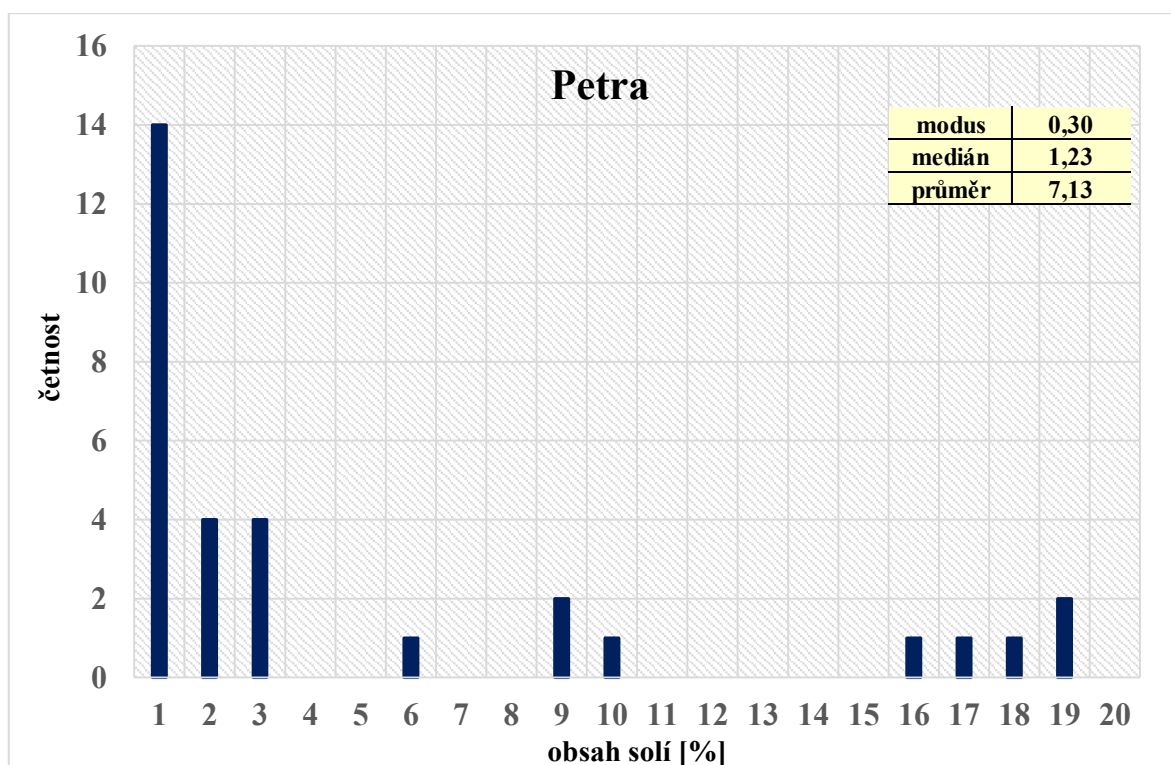
5.1.4. Lokalita Petra, Jordánsko

Vzorky v Petře byly odebírány J. Bruthansem v červnu roku 2014. Nejvíce vzorků bylo odebráno ze skalní hrobky Ad-Deir – 18 vzorků z prvního patra, 4 vzorky z pilířů při bázi a 1 vzorek z komory v přízemí. Dále byly odebrány 3 vzorky z okolí nádvoří Temenos a 7 vzorků z tafoni. V tabulce 5.20 jsou uvedeny hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí všech loužených vzorků. Z 33 výluhů jsem nechala analyzovat 28 vzorků.

Tabulka 5.20: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Petra.

název vzorku	místo odběru vzorku	konduktivita [μS/cm] měřená po 12h loužení	TDS [mg/l] analyzovaných vzorků	TDS [mg/l] dopočítaná pomocí regrese	hm. % solí
AD I/1	1. patro Ad-Deir	3780	1814	1822	18,2
AD I/2	1. patro Ad-Deir	199	116	96	1,0
AD I/3	1. patro Ad-Deir	255	153	123	1,2
AD II/1	1. patro Ad-Deir	555	237	267	2,7
AD II/2	1. patro Ad-Deir	237	91	114	1,1
AD II/3	1. patro Ad-Deir	3220	1498	1552	15,5
AD II/4	1. patro Ad-Deir	1926	852	928	9,3
AD II/5	1. patro Ad-Deir	1675	751	807	8,1
AD II/6	1. patro Ad-Deir	8560	3756	4125	41,3
AD II/7	1. patro Ad-Deir	3370	1528	1624	16,2
AD II/8	1. patro Ad-Deir	301	163	145	1,5
AD III/0	1. patro Ad-Deir	1845	799	889	8,9
AD III/1	1. patro Ad-Deir	58	-	28	0,3
AD III/2	1. patro Ad-Deir	3900	1694	1879	18,8
AD III/3	1. patro Ad-Deir	50	-	24	0,2
AD III/4	1. patro Ad-Deir	81	61	39	0,4
AD IV/1	1. patro Ad-Deir	250	109	120	1,2
AD IV/2	1. patro Ad-Deir	62	-	30	0,3
P2	pilíř Ad-Deir	11110	4978	5354	53,5
P4	pilíř Ad-Deir	1061	670	511	5,1
P6	pilíř Ad-Deir	619	348	298	3,0
P7	pilíř Ad-Deir	77	37	37	0,4
K3	přízemí Ad-Deir	104	42	50	0,5
A1	okolí Temenos	580	273	280	2,8
A2	okolí Temenos	24	-	12	0,1
A4	okolí Temenos	3660	2150	1764	17,6
T1	tafoni	132	93	64	0,6
T2	tafoni	127	58	61	0,6
T3	tafoni	152	70	73	0,7
T4	tafoni	96	51	46	0,5
T5	tafoni	194	89	93	0,9
T6	tafoni	64	-	31	0,3
T8	tafoni	472	339	227	2,3

Obsah solí je značně variabilní a pohybuje se mezi 0,1 až 53,5 hm. % (7,1 hm. % v průměru). Zastoupení četnosti koncentrací solí je znázorněno na grafu na obrázku 5.7. Z grafu jsem vyloučila odlehlé hodnoty vzorku AD II/6 (41,3 hm. %) a P2 (53,5 hm. %). Obecně je obsah solí ze vzorků z hrobky Ad-Deir výrazně vyšší (10,3 hm. % v průměru) než ze vzorků odebraných z tafoni (0,9 hm. % v průměru).



Obrázek 5.7: Četnosti obsahu solí na lokalitě Petra.

V tabulce 5.21 jsou uvedeny střední hodnoty (medián) a průměrné hodnoty koncentrací jednotlivých iontů a dále střední a průměrná hodnota celkové mineralizace (TDS) v jednotkách ppm vypočtené z výsledků analýz vzorků odebraných na lokalitě Petra. Dále v tabulce 5.21 uvádím průměrné procentuální zastoupení daných iontů z celkového množství kationtů nebo aniontů.

Tabulka 5.21: Hodnoty průměrných koncentrací a mediánů koncentrací iontů na lokalitě Petra.

	MEDIÁN [ppm]	PRŮMĚR [ppm]	% zastoupení kationtů nebo aniontů
Al	33	33	0%
Ca	2569	4789	16%
Fe	0	42	0%
K	14	189	1%
Mg	132	207	1%
Mn	1	1	0%
Na	3203	23014	79%
NH₄	1	1	0%
anorg C	494	486	-
SO₄	1702	7529	15%
Cl	5350	39443	80%
NO₃	294	784	2%
PO₄	2	38	0%
TDS	13794	76556	-

Byla pozorována velmi úzká korelace mezi sodíkem a chloridy ($R = 1$) a vápníkem a sírany ($R = 0,95$). Vysoké korelace vychází i pro sírany s dalšími kationty (draslíkem, hořčíkem a manganem). Pro minerály nitrokalit a sylvin stanovené v Petře pomocí XRD vychází také pozitivní korelace ($R = 0,89$) a ($R = 0,55$). Pro ionty vápníku a chloridy je Pearsonův korelační koeficient R roven 0,59. Všechny hodnoty korelačních koeficientů mezi stanovovanými ionty jsou uvedeny v tabulce 5.22. Hodnoty $R \geq 0,5$ jsou v tabulce vyznačeny tučně, hodnoty korelačních koeficientů pro soli vyskytující se na základě mých výpočtů na dané lokalitě jsou vyznačeny tučně a červeně.

Tabulka 5.22: Korelace stanovených iontů na lokalitě Petra.

Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	SO ₄	Cl	NO ₃	PO ₄	NH ₄	
-0,13	0,62	-0,05	0,04	0,61	0,40	-0,15	0,41	-0,14	-0,03	0,66	Al
x	0,03	0,67	0,90	0,04	0,59	0,95	0,59	0,60	0,66	-0,04	Ca
-	x	-0,04	0,27	0,95	0,55	-0,06	0,58	-0,12	-0,01	0,94	Fe
-	-	x	0,55	-0,02	0,60	0,80	0,55	0,89	0,98	-0,04	K
-	-	-	x	0,29	0,59	0,86	0,60	0,47	0,53	0,20	Mg
-	-	-	-	x	0,52	-0,02	0,54	-0,11	0,01	0,88	Mn
-	-	-	-	-	x	0,50	1,00	0,49	0,64	0,59	Na
-	-	-	-	-	-	x	0,48	0,70	0,77	-0,12	SO ₄
-	-	-	-	-	-	-	x	0,44	0,59	0,61	Cl
-	-	-	-	-	-	-	-	x	0,87	-0,09	NO ₃
-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-0,01	PO ₄

Při výpočtech obsahu solí jsem nejdříve vypočítala zastoupení halitu a sádrovce, pro které vychází vysoké korelační koeficienty a byly potvrzeny několika autory analýzou XRD. Dále jsem vypočítala zastoupení minerálu nitrokalitu s celkovým množstvím draslíku, pro nějž je ve většině případů limitující množství draslíku. Zastoupení minerálu sylvínu jsem počítala také z celkového množství draslíku, jeho koncentrace je však pro vznik tohoto minerálu ve většině případů limitující. Procentuální zastoupení hypotetického CaCl_2 (po většinu času vyskytujícího se ve formě roztoku) jsem počítala pouze s molárním množstvím chloridů, které zbylo po vysrážení halitu a molárním množstvím iontů vápníku, které zbylo po vysrážení sádrovce. Data o relativním zastoupení jednotlivých minerálů jsou uvedeny v tabulce 5.23.

Tabulka 5.23: Souhrn zastoupení jednotlivých solí na lokalitě Petra.

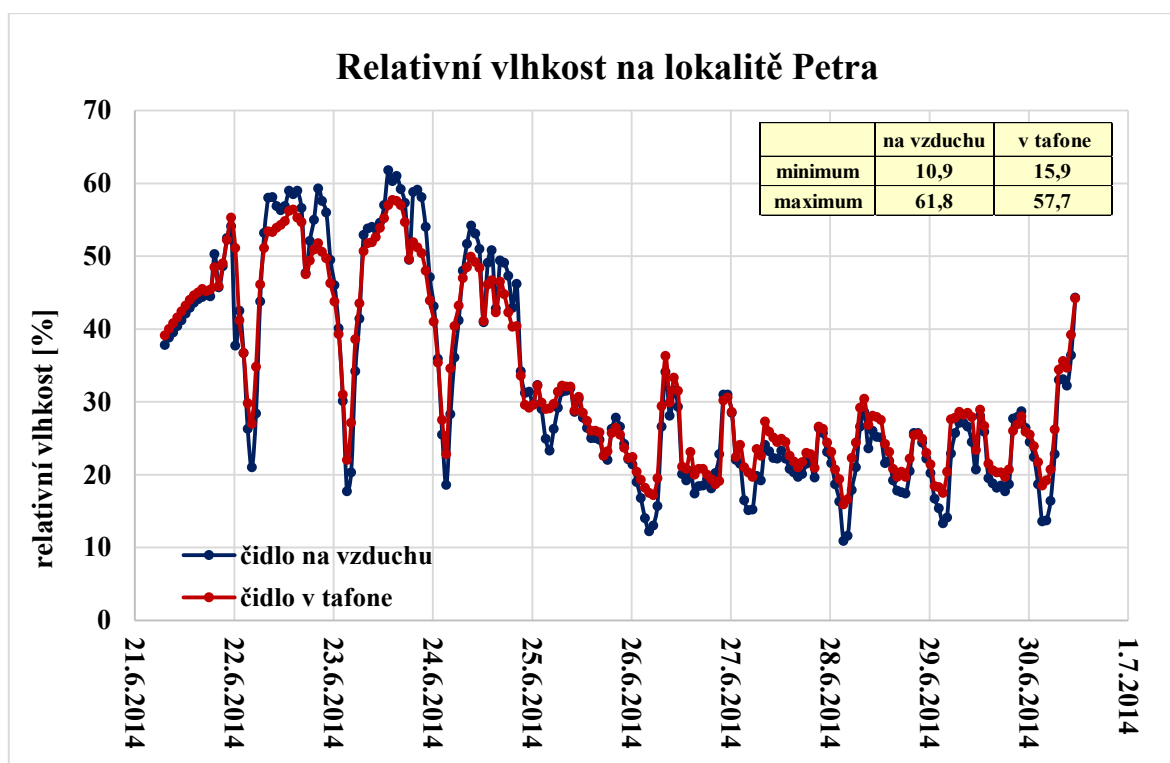
název vzorku	místo odběru vzorku	NaCl hm. %	CaSO ₄ hm. %	KNO ₃ hm. %	CaCl ₂ hm. %	KCl hm. %	suma solí hm. %
AD I/1	1. patro Ad-Deir	83%	2%	0,0%	9%	0,02%	94%
AD I/2	1. patro Ad-Deir	42%	6%	0,1%	38%	0,10%	86%
AD I/3	1. patro Ad-Deir	1%	63%	0,0%	0%	0,03%	64%
AD II/1	1. patro Ad-Deir	70%	9%	0,5%	0%	0,05%	80%
AD II/2	1. patro Ad-Deir	74%	11%	0,3%	5%	0,21%	91%
AD II/3	1. patro Ad-Deir	88%	2%	0,1%	6%	0,09%	96%
AD II/4	1. patro Ad-Deir	91%	1%	0,1%	4%	0,07%	96%
AD II/5	1. patro Ad-Deir	84%	3%	0,2%	7%	0,14%	94%
AD II/6	1. patro Ad-Deir	90%	1%	0,0%	3%	0,02%	94%
AD II/7	1. patro Ad-Deir	87%	1%	0,0%	6%	0,02%	94%
AD II/8	1. patro Ad-Deir	33%	45%	0,0%	6%	0,03%	85%
AD III/0	1. patro Ad-Deir	86%	4%	0,1%	4%	0,04%	94%
AD III/2	1. patro Ad-Deir	89%	4%	0,0%	0%	0,00%	93%
AD III/4	1. patro Ad-Deir	16%	20%	0,1%	46%	0,10%	82%
AD IV/1	1. patro Ad-Deir	71%	5%	0,0%	14%	0,03%	90%
P2	pilíř Ad-Deir	75%	17%	2,1%	0%	1,44%	94%
P4	pilíř Ad-Deir	13%	57%	3,4%	0%	1,04%	73%
P6	pilíř Ad-Deir	36%	30%	0,6%	15%	0,42%	82%
P7	pilíř Ad-Deir	1%	18%	0,1%	23%	0,07%	42%
K3	přízemí Ad-Deir	11%	10%	4,4%	9%	3,21%	35%
A1	okolí Temenos	59%	17%	0,3%	17%	0,25%	94%
A4	okolí Temenos	50%	31%	0,0%	6%	0,04%	87%
T1	tafoni	12%	32%	0,0%	41%	0,03%	85%
T2	tafoni	31%	29%	0,0%	12%	0,02%	71%
T3	tafoni	27%	26%	0,1%	30%	0,09%	82%
T4	tafoni	21%	25%	0,1%	40%	0,08%	86%
T5	tafoni	53%	9%	0,0%	20%	0,05%	81%
T8	tafoni	5%	64%	0,1%	13%	0,06%	82%
PRŮMĚR		50%	19%	0,5%	13%	0,28%	83%

V tabulce 5.24 jsou shrnuty průměrné obsahy solí odebraných z různých míst v Petře. Halit dominuje ve vzorcích odebraných z monumentu, což je ve shodě se studiemi provedenými autory Heinrichs (2008) a Wederkind a Ruerdich (2013) a tvoří zde 67 hm. % v průměru ze vzorků odebraných z prvního patra hrobky Ad-Deir. Ve vzorcích odebraných z pilířů v přízemí je již halit zastoupen v podobném množství (27 hm. %) jako v tafoni (25 hm. %). Sádovec naopak dominuje ve vzorcích odebraných z tafoni, kde tvoří 31 hm. % v průměru. Srážení halitu je limitováno množstvím sodíku a srážení sádovce množstvím síranů. Po jejich vysrážení zbývá značné množství iontů chloridů a vápníku – hypoteticky tedy může vznikat minerál antarkticit ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), který je velmi rozpustný a pro jeho srážení je nutná velmi nízká relativní vlhkost vzduchu (pod 30,8 %). Nelze vyloučit, že se

tento minerál vyskytuje ve formě reziduální solanky a krystalizuje pouze výjimečně v horkých letních měsících a má tedy také vliv na rozpad přípovrchové zóny horniny. Možnou přítomnost tohoto silně hygroskopického minerálu naznačuje i výskyt vlhkých fleků pozorovaných na povrchu pískovce (J. Bruthans 2017 – ústní sdělení). Na grafu na obrázku 5.8 jsou vyneseny hodnoty rovnovážné relativní vlhkosti naměřené během konce června 2014, kdy probíhal odběr vzorků a je zde vidět, že relativní vlhkost padá pod kritickou hodnotu nutnou pro srážení CaCl_2 . Průměrný obsah CaCl_2 je na základě mých výpočtů 13 hm. % a dosahuje maximální hodnoty až 46 hm. % z celkového obsahu rozpuštěných solí ve výluhu. Další soli jsou zastoupeny pouze v minoritním množství. V několika vzorcích odebraných z pilířů a v přízemí jsem stanovila nitrokalit s obsahem 2,1 – 4,4 hm. %, což je také ve shodě s tvrzením Heinrichse (2008). Ve vzorcích odebraných z prvního patra hrobky Ad-Deir je již nitrokalit zastoupen pouze 0,11 % v průměru a v tafoni pouze 0,07 % v průměru. Minerál sylvin je na základě mých výpočtů obsažen ve výluzích pouze s průměrným zastoupením okolo 1 hm. %.

Tabulka 5.24: Obsahy solí na lokalitě Petra – shrnutí.

	obsah solí ve vzorku vůči pevné fázi hm. %	NaCl hm. %	CaSO_4 hm. %	CaCl_2 hm. %	KNO_3 hm. %
1. patro Ad-Deir	8,12%	67%	12%	10%	0,11%
přízemí a pilíře Ad-Deir	12,50%	27%	26%	10%	2,10%
tafoni	0,85%	25%	31%	26%	0,07%



Obrázek 5.8: Naměřené hodnoty rovnovážné relativní vlhkosti na lokalitě Petra z období, kdy probíhal odběr vzorků (21. 6. 2014 – 30. 6. 2014).

5.1.5. Lokalita Crystal Peak, Utah, USA

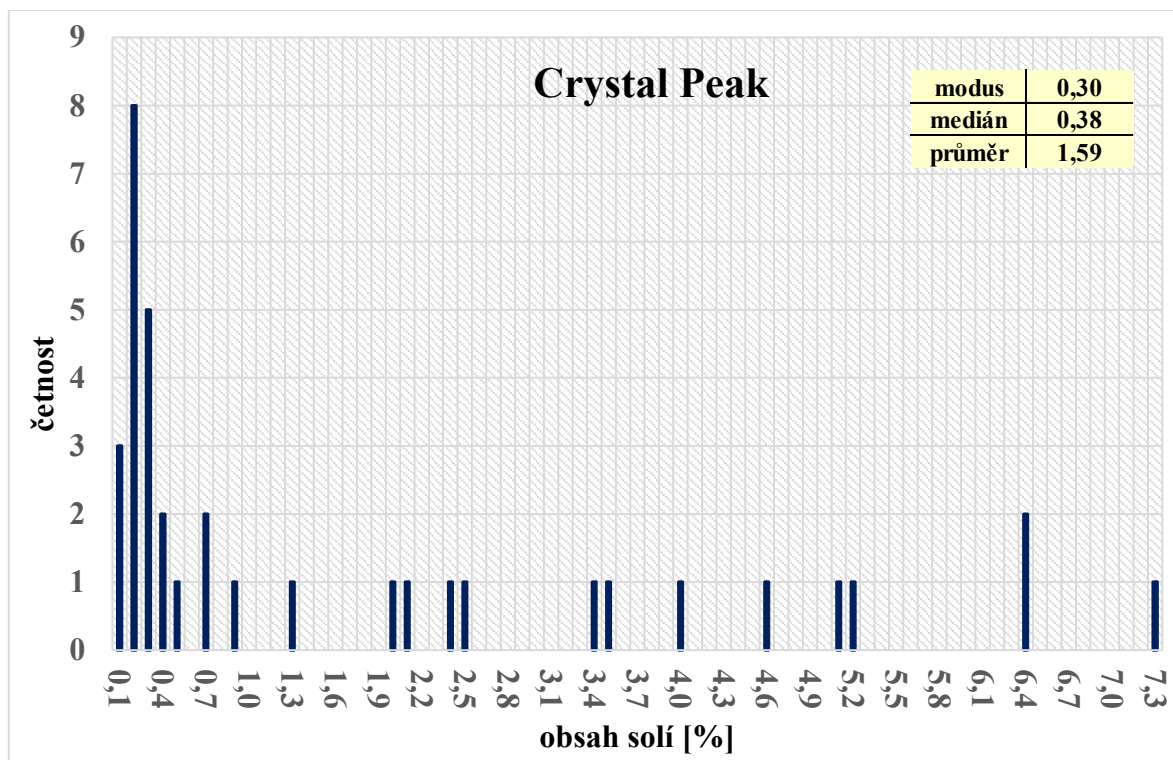
Vzorky na lokalitách Crystal Peak a Helper ve státě Utah v USA byly odebírány v září roku 2016. Při odběru vzorků se kolegové zaměřili na vzorkování v jednotlivých prohlubních (u názvů vzorků označení D) a vnějších částech (vizorech, označení V) jednotlivých tafoni. Dále byly na lokalitách v USA odebírány též vzorky z různých hloubkových intervalů.

Na lokalitě Crystal Peak jsem ze 40 loužených vzorků nechala analyzovat 22 vzorků. V tabulce 5.25 je uveden seznam vzorků, hodnoty konduktivity měřené ihned po zalití vzorku destilovanou vodou, hodnoty konduktivity měřené po 12 h loužení, celková mineralizace analyzovaných vzorků, celková mineralizace všech vzorků dopočítaná pomocí regrese a hmotnostní procenta obsahu solí vůči celkové pevné fázi. V tabulce 5.25 je vidět, že v některých případech se hodnota konduktivity ihned po zalití vzorku výrazně neliší od hodnoty konduktivity naměřené po 12 hodinách loužení, v některých případech je však rozdíl značný. Rozdíl je dán různou rychlostí rozpouštění jednotlivých solí. Obsah solí u totožných vzorků odebraných z různých hloubkových intervalů (v tabulce vyznačeny barevně) směrem do hloubky klesá (vyjma vzorku 55CV, kde obsah solí kolísá kolem průměrné hodnoty 0,27 hm. %).

Tabulka 5.25: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Crystal Peak; V – vyčnívající části, D – důlky a prohlubně.

název vzorku	hloubka odběru vzorku [cm]	konduktivita [$\mu\text{S}/\text{cm}$] ihned po zalití vzorku	konduktivita [$\mu\text{S}/\text{cm}$] po 12 h loužení	TDS [mg/l] analyzovaných vzorků	TDS [mg/l] dopočítaná pomocí regrese	hm. % solí
56/1Vv	0 - 1	34	57	23	29	0,29
56/1D	0 - 1	968	1014	430	516	5,16
56/1D	1 - 3	872	895	-	455	4,55
56/1V	1 - 3	65	82	-	42	0,42
56/2V	0 - 1	15	46	-	23	0,23
56/2D	0 - 1	760	792	436	403	4,03
56/3V	0 - 1	20	41	-	21	0,21
56/3D	0 - 1	42	67	-	34	0,34
56/4V	0 - 1	9	35	-	18	0,18
56/4D	0 - 1	27	58	-	30	0,30
56/6V	0 - 1	8	43	18	22	0,22
56/6D	0 - 1	1390	1434	774	729	7,29
56/5VP	0 - 1	7	39	-	20	0,20
56/5V	0 - 1	4	32	12	16	0,16
56/5D1	0 - 1	1181	1265	657	644	6,44
56/5D2	0 - 1	624	678	-	345	3,45
56/5D3	0 - 1	1196	1265	-	644	6,44
56/5D4	0 - 1	304	696	-	354	3,54
55A1	0 - 1	415	472	-	240	2,40
55A2	0 - 1	4	23	-	12	0,12
55B1	0 - 1	933	994	515	506	5,06
55B2	0 - 1	3	15	7	8	0,08
55C1	0 - 1	320	486	-	247	2,47
55C2	0 - 1	3	9	-	5	0,05
55AbD	0 - 1	312	417	196	212	2,12
55AbD	1 - 3	220	261	107	133	1,33
55AbD	3 - 5	79	144	62	73	0,73
55AbD	5 - 10	64	91	38	46	0,46
55AbV	0 - 1	4	16	7	8	0,08
55AbV	1 - 3	3	7	-	4	0,04
55AbV	3 - 5	3	5	-	3	0,03
55AbV	5 - 10	2	4	-	2	0,02
55CV	0 - 1	31	58	26	30	0,30
55CV	1 - 3	32	48	22	24	0,24
55CV	3 - 5	32	49	22	25	0,25
55CV	5 - 10	28	53	23	27	0,27
55CD	0 - 1	322	395	185	201	2,01
55CD	1 - 3	149	180	72	92	0,92
55CD	3 - 5	98	130	59	66	0,66
55CD	5 - 10	60	85	42	43	0,43

Obsah solí se na lokalitě Crystal Peak pohybuje mezi 0,02 až 7,3 hm. % (1,6 hm. % v průměru). Četnost jednotlivých koncentrací solí je znázorněna na grafu na obrázku 5.9.



Obrázek 5.9: Četnosti obsahu solí na lokalitě Crystal Peak.

V tabulkách 5.26 a 5.27 jsou uvedeny střední hodnoty (medián) a průměrné hodnoty koncentrací jednotlivých iontů a dále střední a průměrná hodnota celkové mineralizace (TDS) v jednotkách ppm vypočtené z výsledků analýz vzorků odebraných na lokalitě Crystal Peak. Jelikož se hodnoty značně liší pro vzorky obsahující anorganický uhlík a pro vzorky bez anorganického uhlíku, uvádím výsledky pro tyto dvě skupiny vzorků zvlášť. Dále v tabulkách uvádím průměrné procentuální zastoupení daných iontů z celkového množství kationtů nebo aniontů.

Tabulka 5.26: Hodnoty průměrných koncentrací a mediánů koncentrací iontů na lokalitě Crystal Peak – vzorky obsahující anorganický uhlík.

	MEDIÁN [ppm]	PRŮMĚR [ppm]	% zastoupení kationtů nebo aniontů
Al	5	5	1%
Ca	340	325	38%
K	163	158	19%
Mg	65	70	8%
Na	200	286	34%
Si	285	277	-
anorg C	578	495	-
Sr	1	1	0%
SO₄	0	2	1%
Cl	10	231	93%
NO₃	9	15	6%
TDS	1654	1867	-

Tabulka 5.27: Hodnoty průměrných koncentrací a mediánů koncentrací iontů na lokalitě Crystal Peak – vzorky neobsahující anorganický uhlík.

	MEDIÁN [ppm]	PRŮMĚR [ppm]	% zastoupení kationtů nebo aniontů
Al	1	3	0%
Ca	1358	2428	25%
K	145	204	2%
Mg	673	932	9%
Na	2125	6275	64%
Si	86	126	-
anorg C	0	0	-
Sr	10	20	0%
SO₄	510	1019	5%
Cl	9475	16474	87%
NO₃	133	1419	8%
TDS	14515	28900	-

V následujících tabulkách 5.28 a 5.29 uvádím hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu pro jednotlivé ionty. Hodnoty $R \geq 0,5$ jsou v tabulkách vyznačeny tučně, hodnoty korelačních koeficientů pro soli zastoupené na základě mých výpočtů na dané lokalitě jsou vyznačeny tučně a červeně. Korelace i výpočty obsahu jednotlivých solí na lokalitě Crystal

Peak jsem provedla zvlášť pro vzorky, ve kterých byl detekován anorganický uhlík a zvlášť pro vzorky s nulovými hodnotami anorganického uhlíku.

V případě vzorků s anorganickým uhlíkem vychází nejsilnější korelace pro minerál halit ($R = 0,90$). Dále jsem počítala hodnoty R pro uhličitanové minerály a vychází pozitivní korelace mezi uhlíkem a vápníkem ($R = 0,86$) a mezi uhlíkem a hořčíkem ($R = 0,67$). Silná korelace ukazuje i na možný výskyt minerálu nitrokalitu – $R = 0,78$. Vzorky obsahující anorganický uhlík neobsahují žádné sírany, proto nebudou v těchto vzorcích zastoupeny žádné síranové minerály.

Tabulka 5.28: Korelace stanovených iontů na lokalitě Crystal Peak pro vzorky obsahující anorganický C.

Ca	K	Mg	Na	Si	Sr	Cl	NO ₃	C	
-0,26	0,29	-0,55	-0,01	0,18	-0,30	-0,22	0,63	0,03	Al
x	0,20	0,81	-0,22	0,52	0,76	-0,27	0,01	0,86	Ca
-	x	0,08	0,31	0,73	0,26	-0,05	0,78	0,54	K
-	-	x	-0,08	0,39	0,79	-0,05	-0,28	0,67	Mg
-	-	-	x	0,03	0,02	0,90	0,16	-0,22	Na
-	-	-	-	x	0,74	-0,34	0,63	0,85	Si
-	-	-	-	-	x	-0,16	0,15	0,81	Sr
-	-	-	-	-	-	x	-0,25	-0,46	Cl

U vzorků s nulovými hodnotami anorganického uhlíku vychází silný korelační koeficient pro minerál halit ($R = 0,83$). Korelační koeficienty dusičnanů s ionty draslíku ($R = 0,91$) a sodíku ($R = 0,54$) ukazují na možnou přítomnost minerálů nitrokalitu a nitronatritu. Hodnota $R = 0,58$ pro ionty vápníku a chloridů ukazuje na možnou přítomnost reziduální solanky CaCl_2 , jako v případě lokality Petra.

Tabulka 5.29: Korelace stanovených iontů na lokalitě Crystal Peak pro vzorky neobsahující anorganický C.

Ca	K	Mg	Na	Si	Sr	SO ₄	Cl	NO ₃	
-0,19	0,64	-0,28	0,69	0,40	0,14	-0,19	0,45	0,60	Al
x	-0,12	0,94	0,06	0,27	0,77	0,14	0,58	-0,08	Ca
-	x	-0,15	0,75	0,74	-0,08	0,15	0,44	0,91	K
-	-	x	0,13	0,07	0,81	0,40	0,62	-0,16	Mg
-	-	-	x	0,29	0,31	0,45	0,83	0,54	Na
-	-	-	-	x	0,00	-0,24	0,24	0,83	Si
-	-	-	-	-	x	0,19	0,71	-0,02	Sr
-	-	-	-	-	-	x	0,46	-0,10	SO ₄
-	-	-	-	-	-	-	x	0,27	Cl

U vzorků obsahujících anorganický uhlík (tabulka 5.30) jsem nejdříve vypočítala zastoupení minerálů kalcitu a aragonitu (CaCO_3), které tvoří v průměru 44 hm. % solí rozpuštěných v daném vzorku. Ze zbytkového množství uhlíku jsem vypočítala procentuální zastoupení magnezitu (14 hm. % v průměru). Ve svých výpočtech neuvažuji pravděpodobnou kombinaci těchto dvou minerálů – minerál dolomit s chemickým vzorcem ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Případné množství dolomitu by bylo rovno dvojnásobku množství MgCO_3 a o to méně by pak bylo kalcitu. Dále jsem vypočítala zastoupení halitu (14 hm. % v průměru), který dosahuje maxima 71 hm. % ve vzorku 55CD odebraného v hloubce 5 – 10 cm pod povrchem. Tento vzorek je jako jediný ze skupiny vzorků obsahující anorganický uhlík odebraný z důlku tafone a jako jediný obsahuje malé množství síry. Pro minerál nitrokalit je limitující množství dusičnanů a jeho relativní zastoupení je pouze 2 hm. % v průměru.

Tabulka 5.30: Obsah solí ve vzorcích obsahující anorganický uhlík.

název vzorku	hloubka odběru vzorku [cm]	CaCO_3 hm. %	MgCO_3 hm. %	NaCl hm. %	KNO_3 hm. %	suma solí hm. %
56/1Vv	0 - 1	77%	15%	7%	1%	100%
56/6V	0 - 1	59%	19%	5%	2%	85%
56/5V	0 - 1	77%	19%	5%	3%	103%
55B2	0 - 1	15%	12%	16%	3%	46%
55AbV	0 - 1	46%	28%	11%	4%	89%
55CV	0 - 1	55%	20%	5%	1%	81%
55CV	1 - 3	39%	11%	5%	2%	58%
55CV	3 - 5	39%	9%	5%	3%	56%
55CV	5 - 10	26%	5%	7%	5%	43%
55CD	5 - 10	10%	5%	71%	1%	87%
PRŮMĚR		44%	14%	14%	2%	75%

U vzorků neobsahující anorganický uhlík (tabulka 5.31) je nejvíce zastoupeným minerálem halit s 50 hm. % rozpustné složky v průměru. Pro srážení halitu je limitující množství sodíku, vyjma vzorku 56/2D kde srážení limitují chloridy. Všechny tyto vzorky obsahují malé množství síry, pro vznik sádrovce je tedy limitující množství síranů a sádrovec se může vyskytovat pouze s průměrným obsahem 5 hm. %. Protože po vysrážení halitu a sádrovce zbývá dostatečné množství vápníku a chloridů, může se zde teoreticky tvořit minerál antarkticit s průměrným zastoupením 22 hm. % a maximální hodnotou až 65 hm. % z celkového množství solí obsažených v daném výluhu. Sledované hodnoty relativních

vlhkostí měřené na této lokalitě čidlem, potvrzují možný výskyt tohoto minerálu, protože relativní vlhkost zde klesá pod kritickou hodnotu RH (30,8 %) nutnou pro jeho srážení. Minerál nitrokalit tvoří 2 hm. % v průměru.

Tabulka 5.31: Obsah solí ve vzorcích neobsahující anorganický uhlík.

název vzorku	hloubka odběru vzorku [cm]	CaSO ₄ hm. %	NaCl hm. %	CaCl ₂ hm. %	KNO ₃ hm. %	suma solí hm. %
56/1D	1 - 3	1%	5%	65%	1%	71%
56/2D	0 - 1	1%	64%	0%	4%	69%
56/6D	0 - 1	4%	73%	6%	1%	84%
56/5D1	0 - 1	2%	55%	19%	1%	77%
55B1	0 - 1	10%	52%	13%	1%	77%
55AbD	0 - 1	17%	35%	19%	1%	72%
55AbD	1 - 3	8%	37%	29%	2%	76%
55AbD	3 - 5	1%	46%	33%	1%	81%
55AbD	5 - 10	5%	67%	20%	2%	94%
55CD	0 - 1	14%	62%	9%	1%	86%
55CD	1 - 3	1%	48%	30%	2%	81%
55CD	3 - 5	1%	49%	25%	0%	75%
PRŮMĚR		5%	50%	22%	2%	79%

McBride a Picard (2000) detekovali pomocí XRD ve vzorcích odebraných na této lokalitě hlavně minerály kalcit, aragonit, sádrovec a halit. Relativní zastoupení karbonátových minerálů určené mnou pomocí loužící metody není určující, protože jsou jen nepatrně rozpustné v destilované vodě. Na základě výsledků analyzovaných výluhů je nejhojněji zastoupenou rozpustnou solí minerál halit. Relativní zastoupení halitu v rozpustné složce se značně liší u vzorků s anorganickým uhlíkem (14 hm. % v průměru) a u vzorků bez anorganického uhlíku (50 hm. % v průměru, maximum až 73 hm. % z rozpustné složky). Z celkového množství solí tvoří halit v průměru 0,04 hm. % ve vzorcích obsahujících anorganický uhlík a 1,5 hm. % v průměru ve vzorcích bez anorganického uhlíku, což je více než dle McBrideho a Picarda (2000), podle kterých tvoří halit a sádrovec pouze 0,01 hm. % solných výkvětů. Přítomnost sádrovice nemohu vyloučit pouze ve vzorcích, ve kterých nebyl stanoven žádný anorganický uhlík a to s průměrným obsahem pouze 5 hm. % z rozpustné složky a 0,1 hm. % z celkového množství pevné fáze. Další minerály, jako například nitrokalit (2 hm. % v průměru v rozpustné složce), jsou zastoupeny pouze v minoritním množství.

Vzorky obsahující anorganický uhlík jsou ve většině případů vnějšky tafone (vyjma vzorku 55CD, který byl odebrán v důlku tafone, ale v hloubce 5 – 10 cm pod povrchem). Naopak ve vzorcích odebraných z prohlubní tafone nebyl stanoven anorganický uhlík a vzorky obsahují obecně více solí, hlavně halitu.

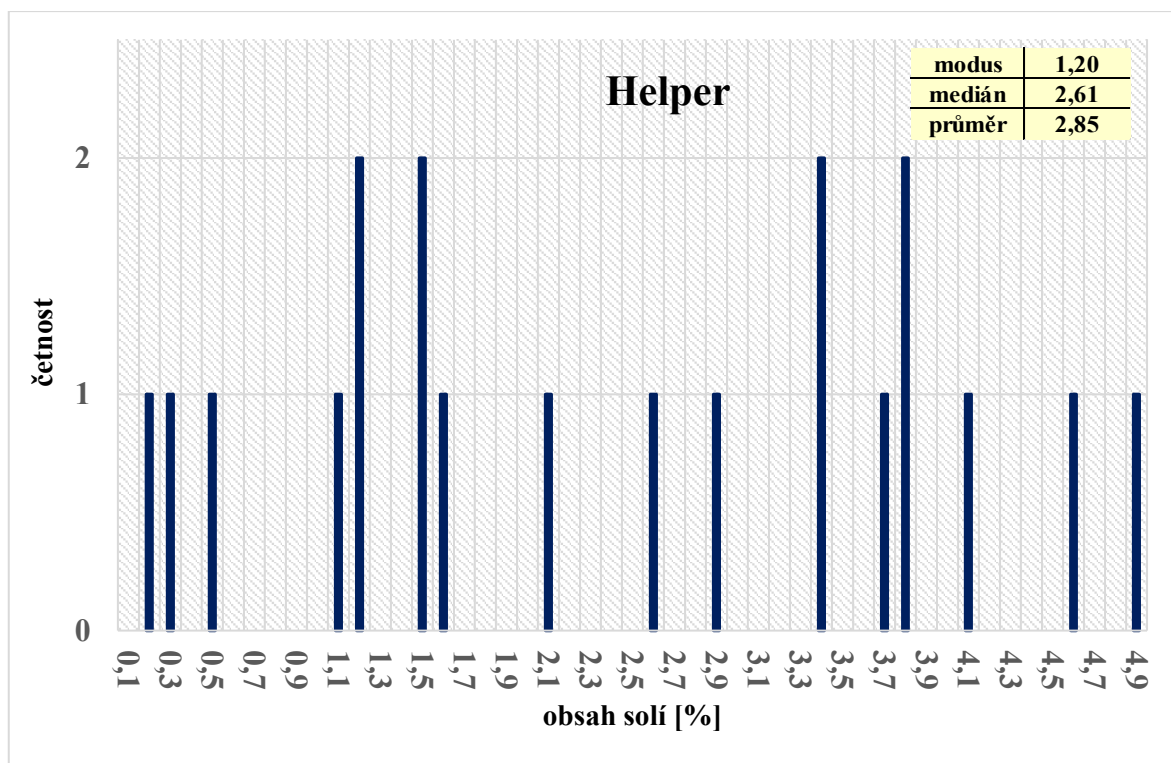
5.1.6. Lokalita Helper, Utah, USA

V tabulce 5.32 je uveden seznam vzorků, hodnoty konduktivity měřené ihned po zalití vzorku destilovanou vodou, hodnoty konduktivity měřené po 12 h loužení, celková mineralizace analyzovaných vzorků, celková mineralizace všech vzorků dopočítaná pomocí regrese a hmotnostní procenta obsahu solí vůči celkové pevné fázi. Z 21 loužených vzorků jsem nechala analyzovat 14 vzorků. V tabulce 5. 32 je vidět, že ihned po zalití vzorku destilovanou vodou nejsou rozpuštěny všechny v destilované vodě rozpustné soli a je třeba vzorky loužit na třepacím přístroji po dobu minimálně 12 h. Celkový obsah solí u totožných vzorků odebraných z různých hloubkových intervalů (v tabulce vyznačeny barevně) směrem do hloubky roste.

Tabulka 5.32: Seznam vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Helper; V – vyčnívající části, D – důlky a prohlubně.

název vzorku	hloubka odběru vzorku [cm]	konduktivita a [μ S/cm] ihned po zalití vzorku	konduktivita a [μ S/cm] po 12 h loužení	TDS [mg/l] analyzovaných h vzorků	TDS [mg/l] dopočítaná pomocí regrese	hm. % solí
K1D1	0 - 1	1462	1573	1674	1139	11,39
K1D2	0 - 1	570	636	-	461	4,61
K1V	0 - 1	57	72	33	52	0,52
K3D	0 - 0,2 (šupiny)	101	162	96	117	1,17
K3D	0 - 2	118	171	106	124	1,24
K3D	3 - 5	395	471	360	341	3,41
K3D	5 - 10	368	521	423	377	3,77
K3V	0 - 3	175	203	121	147	1,47
K3V	3 - 5	173	208	124	151	1,51
K3V	5 - 10	360	402	269	291	2,91
K4D	0 - 3	260	292	-	211	2,11
K4V	0 - 3	187	225	-	163	1,63
K5D1	0 - 1	384	465	335	337	3,37
K5D2	0 - 1	316	360	247	261	2,61
K5V	0 - 1	12	32	13	23	0,23
K6D1	0 - 1	570	671	-	486	4,86
K6D2	0 - 1	406	512	-	371	3,71
K6D3	0 - 1	442	523	-	379	3,79
K6V	0 - 1	110	156	-	113	1,13
K7D	0 - 1	467	560	408	405	4,05
K7V	0 - 1	31	46	18	33	0,33

Obsah solí se pohybuje se mezi 0,2 až 11,4 hm. % (2,9 hm. % v průměru). Četnost koncentrací solí je znázorněna na grafu na obrázku 5.10. Z grafu jsem vyloučila vzorek K1D1 s maximální hodnotou celkového obsahu solí (11,4 hm. %).



Obrázek 5.10: Četnosti obsahu solí na lokalitě Helper.

V tabulce 5.33 jsou uvedeny střední hodnoty (medián) a průměrné hodnoty koncentrací jednotlivých iontů, medián a průměrná hodnota celkové mineralizace (TDS) v jednotkách ppm vypočtené z výsledků analýz vzorků odebraných na lokalitě Helper. Dále v tabulce uvádím průměrné procentuální zastoupení daných iontů z celkového množství kationtů nebo aniontů.

Tabulka 5.33: Hodnoty průměrných koncentrací a mediánů koncentrací iontů na lokalitě Helper.

	MEDIÁN [ppm]	PRŮMĚR [ppm]	% zastoupení kationtů nebo aniontů
Al	3	3	0%
Ca	2510	5476	77%
K	114	114	2%
Mg	701	1185	17%
Na	98	330	5%
Si	80	78	-
anorg C	0	129	-
Sr	4	6	0%
SO₄	9756	16390	95%
Cl	110	572	3%
NO₃	44	277	2%
TDS	13418	24560	-

Nejtěsnější korelace vychází pro minerál halit ($R = 0,98$). Dále byla pozorována velmi úzká korelace mezi sírany s hořčíkem, draslíkem a vápníkem ($R = 0,88$; $R = 0,85$ a $R = 0,83$). Pozitivní korelace vychází i pro dusičnanové minerály nitronatrit ($R = 0,79$) a nitrokalit ($R = 0,70$) a ukazuje i na možnou přítomnost sylvínu ($R = 0,60$). Všechny hodnoty korelačních koeficientů jsou uvedeny v tabulce 5.34. Hodnoty $R \geq 0,5$ jsou v tabulce vyznačeny tučně, hodnoty korelačních koeficientů pro soli předpokládané na základě analyzovaných výluhů na lokalitě Helper jsou vyznačeny tučně a červeně. Z výpočtů byl vyřazen vzorek K1D1 s extrémně vysokými koncentracemi sledovaných iontů.

Tabulka 5.34: Korelace stanovených iontů na lokalitě Helper.

Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Si	Sr	SO ₄	Cl	NO ₃	
-0,79	0,58	-0,87	-0,68	0,23	-0,68	0,30	-0,80	-0,86	-0,58	-0,49	Al
x	-0,50	0,89	0,48	-0,08	0,59	-0,24	0,80	0,83	0,58	0,64	Ca
-	x	-0,56	-0,39	-0,19	-0,29	0,14	-0,37	-0,50	-0,25	-0,21	Fe
-	-	x	0,63	-0,08	0,67	-0,38	0,82	0,85	0,60	0,70	K
-	-	-	x	0,27	0,40	-0,78	0,73	0,88	0,26	0,25	Mg
-	-	-	-	x	-0,13	-0,44	-0,06	0,08	-0,11	-0,08	Mn
-	-	-	-	-	x	-0,08	0,79	0,53	0,98	0,79	Na
-	-	-	-	-	-	x	-0,42	-0,62	0,02	0,04	Si
-	-	-	-	-	-	-	x	0,88	0,72	0,64	Sr
-	-	-	-	-	-	-	-	x	0,43	0,42	SO ₄
-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	0,79	Cl

Relativní zastoupení solí ve výluzích na lokalitě Helper je uvedeno v tabulce 5.35. Nejdříve jsem vypočítala relativní zastoupení sádrovce, jakožto nejméně rozpustného minerálu. U vzorků, pro které nebylo limitující množství síranů, jsem z množství síranů zbývajících po vysrážení sádrovce vypočítala zastoupení jak horečnatého, tak i draselného síranu, pro které vychází pozitivní korelační koeficienty. Dále jsem vypočítala hmotnostní zastoupení halitu.

Tabulka 5.35: Zastoupení solí na lokalitě Helper.

název vzorku	hloubka oděru vzorku [cm]	CaSO ₄ hm. %	K ₂ SO ₄ + MgSO ₄ hm. %	NaCl hm. %	suma solí hm. %
K1V	0 - 1	41%	0%	3%	45%
K1D1	0 - 1	79%	2 - 3%	0%	81%
K3D	0 - 0,2 (šupiny)	35%	42 - 63%	0%	78 - 99%
K3D	0 - 2	54%	26 - 37%	0%	80 - 91%
K3D	3 - 5	75%	0%	0%	75%
K3D	5 - 10	72%	0%	0%	72%
K3V	0 - 3	34%	41 - 59%	3%	78 - 96%
K3V	3 - 5	66%	7 - 11%	2%	75 - 79%
K3V	5 - 10	70%	4 - 6%	2%	76 - 78%
K5D1	0 - 1	54%	13 - 19%	11%	78 - 84%
K5D2	0 - 1	20%	49 - 71%	9%	78 - 100%
K5V	0 - 1	3%	0%	1%	4%
K7D	0 - 1	60%	7 - 10%	8%	75 - 78%
K7V	0 - 1	23%	0%	1%	24%
PRŮMĚR		49%	14 - 20%	3%	66 - 72%

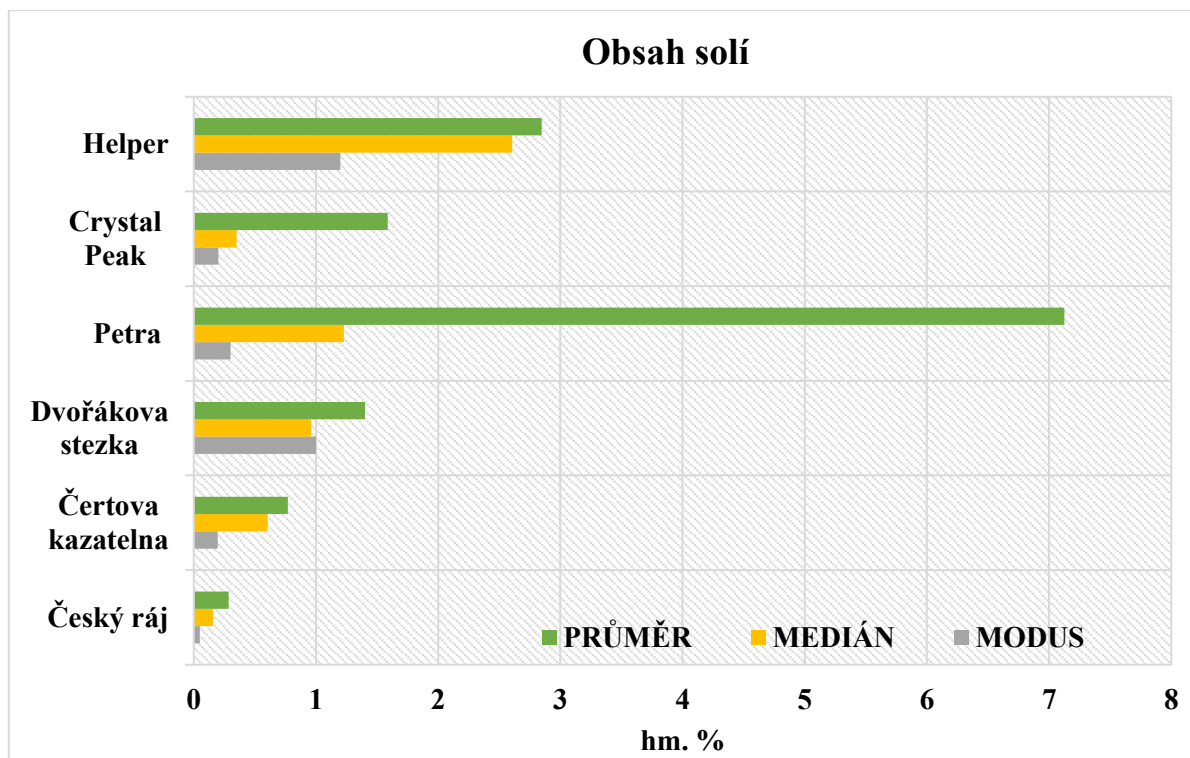
Na základě výpočtu obsahu solí je nejvíce zastoupeným minerálem sádrovec (v průměru 49 hm. %). Dále se zde bude pravděpodobně tvořit draselný či hořečnatý síran, s průměrným maximálním zastoupením 20 hm. % a 14 hm. %. Zastoupení těchto síranových minerálů jsou pouze orientační, bude nejspíše vznikat jejich kombinace se sádrovcem – minerál polyhalit ($K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$) nebo syngenit $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$. Nevylučuji přítomnost halitu s průměrným zastoupením 3 hm. % (a s maximem 11 hm. %) a nitrokalitu s průměrným zastoupením 1 hm. %. Minerály nitronatrit a sylvin se na základě mých výpočtů nebudou ve větším množství tvořit, i když pro ně vychází kladné korelační koeficienty (je pro ně limitující jak množství kationtů, tak i aniontů).

5.2. Diskuze výsledků loužení solí

V tabulce 5.36 a na grafu na obrázku 5.11 uvádím průměrné hodnoty, modus a medián celkového obsahu solí vypočtené na základě regrese pro všechny loužené vzorky na šesti studovaných lokalitách. Na grafu je vidět, že nejvyšší obsahy solí byly naměřeny na lokalitě Petra a obecně jsou vyšší obsahy solí na zahraničních lokalitách (s aridním klimatem). Křemenné pískovce z české křídové pánve (z oblasti Českého ráje a okolí) mají nejnižší hodnoty obsahu solí. Nepozoruji však žádný vztah mezi litologií a obsahem solí. Důležité je, že se ve všech případech jedná o porézní horniny, umožňující transport a krystalizaci solí. Hodnoty obsahu solí mohou být ovlivněny způsobem vzorkování, tím, na co jsme se zaměřili při odběru vzorků a také klimatickými podmínkami v době odběru vzorků.

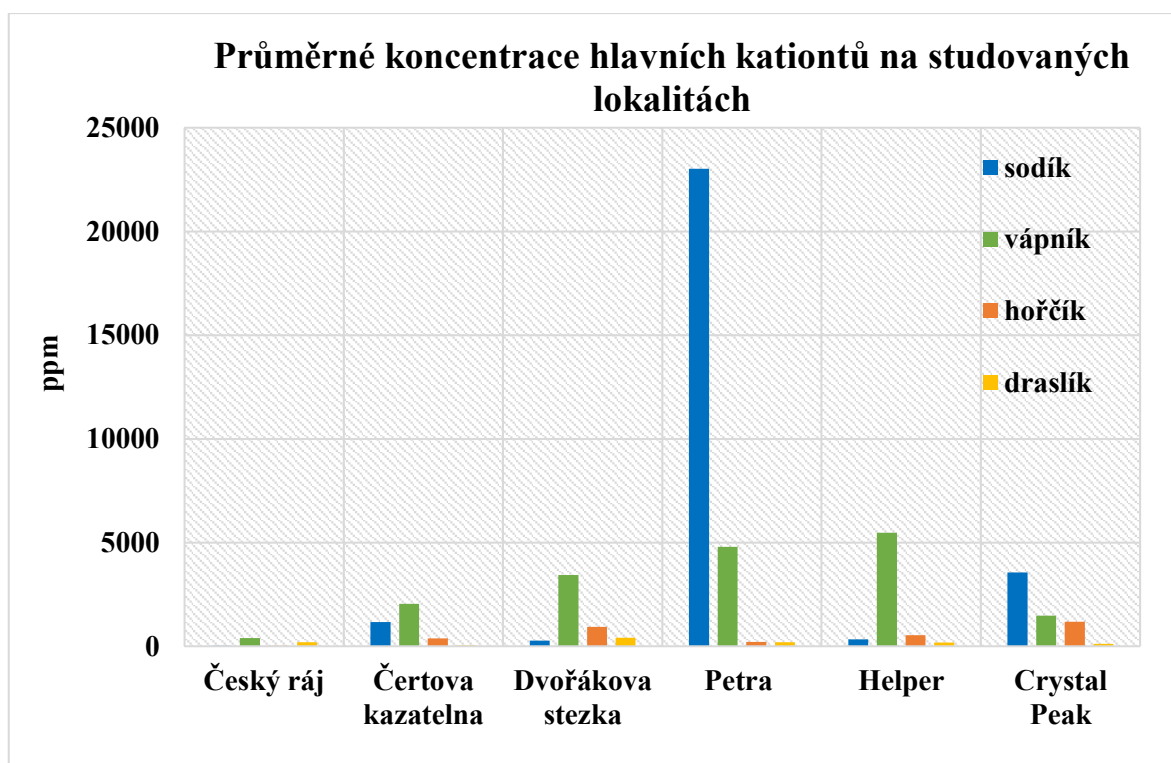
Tabulka 5.36: Obsahy solí na studovaných lokalitách uvedeny v hmotnostních procentech.

	Český ráj	Čertova kazatelna	Dvořákova stezka	Petra	Crystal Peak	Helper
MODUS	0,05	0,20	1,00	0,30	0,20	1,20
MEDIÁN	0,16	0,60	0,96	1,23	0,35	2,61
PRŮMĚR	0,29	0,77	1,40	7,13	1,59	2,85

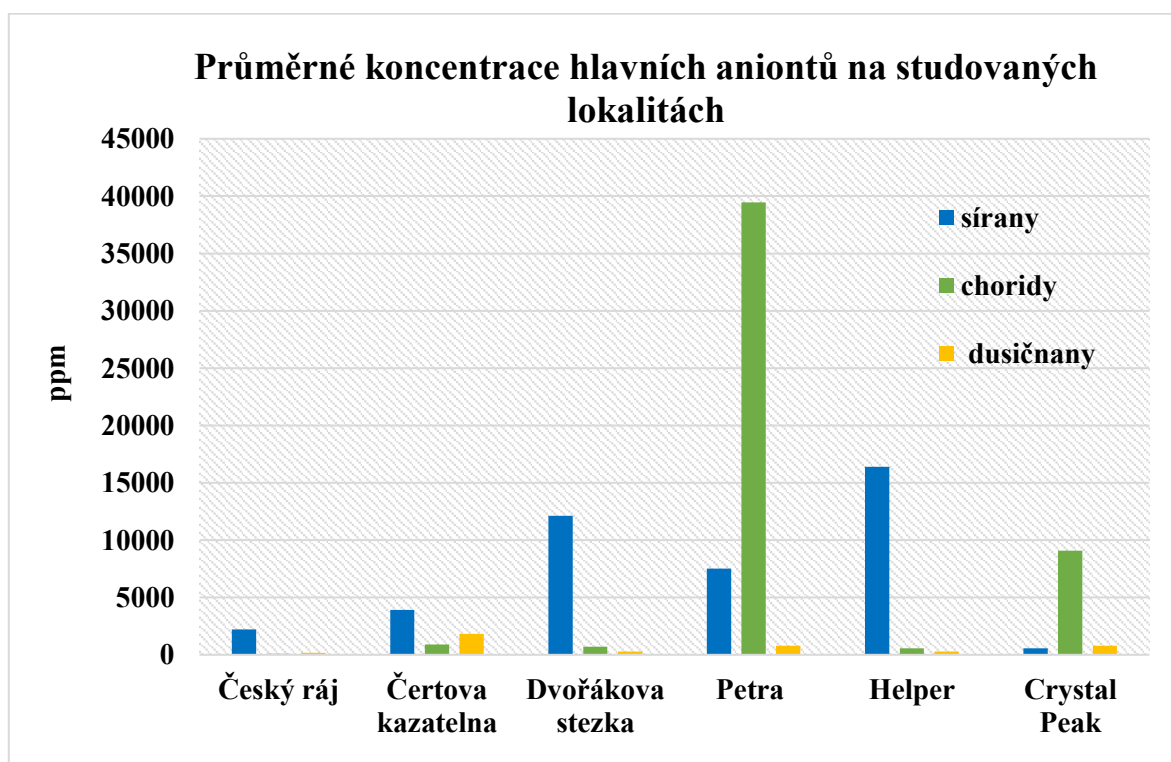


Obrázek 5.11: Porovnání průměrných hodnot, mediánu a modusu obsahu solí na studovaných lokalitách.

Na grafu na obrázku 5.12 je zobrazeno zastoupení hlavních kationtů a na grafu na obrázku 5.13 zastoupení hlavních aniontů v jednotkách ppm vzhledem ke studovaným lokalitám. Na grafech je vidět, že ionty tvořící minerál halit (sodík a chloridy) se vyskytují ve vysokých koncentracích na lokalitě Petra, v menší míře pak na lokalitě Crystal Peak. Na ostatních studovaných lokalitách dominují z aniontů sírany. Síranů je nejvíce na lokalitě Helper, na lokalitě Crystal Peak jsou naopak zastoupeny nejméně. Nejvíce dusičnanů se nachází na lokalitě Čertova kazatelna. V Českém ráji jsou obecně nejnižší koncentrace sledovaných iontů. Pro přehled jsou mediány koncentrací a průměrné hodnoty koncentrací všech analyzovaných iontů na všech studovaných lokalitách uvedeny v tabulkách 5.37 a 5.38.



Obrázek 5.12: Průměrné koncentrace hlavních kationtů na studovaných lokalitách.



Obrázek 5.13: Průměrné koncentrace hlavních aniontů na studovaných lokalitách.

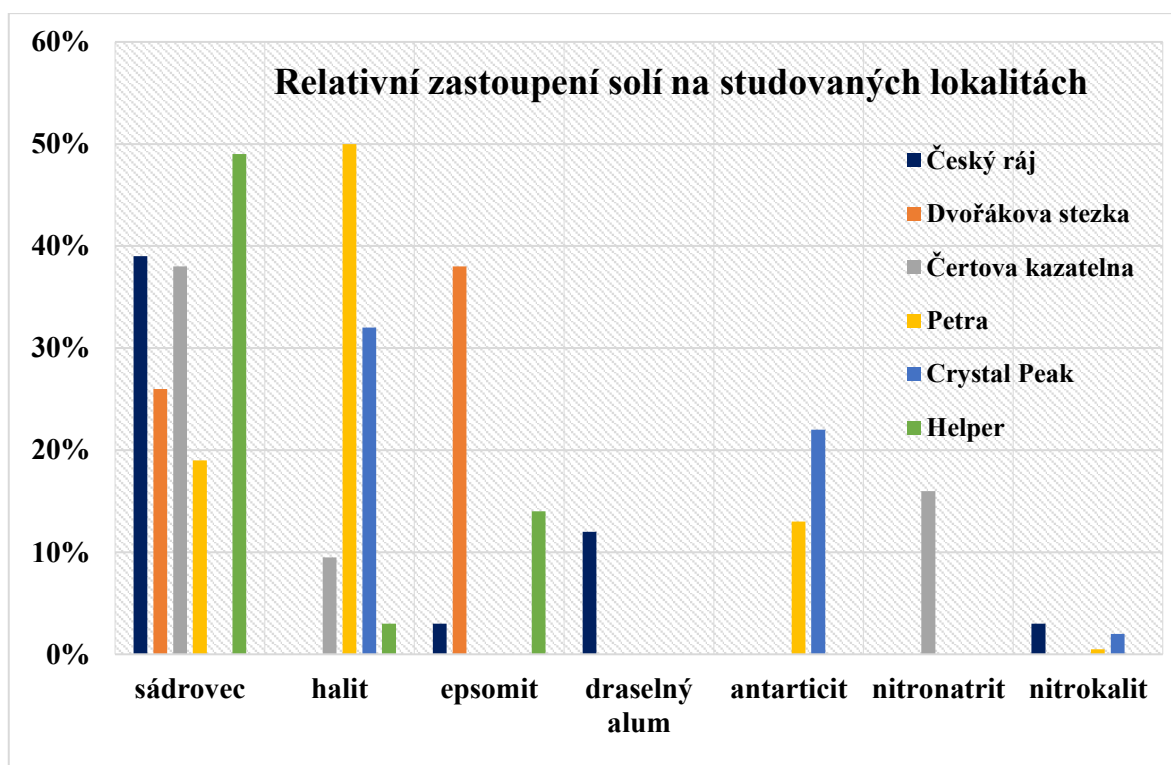
Tabulka 5.37: Mediány koncentrací všech studovaných iontů na všech studovaných lokalitách.

MEDIÁN [ppm]	Český ráj	Čertova kazatelna	Dvořáková stezka	Petra	Crystal Peak	Helper
Al	16	0	5	33	3	3
Ca	278	2153	232	2569	541	2510
Fe	9	1	9	0	0	0
K	100	46	330	14	146	114
Mg	13	403	1008	132	121	701
Mn	13	0	1	1	0	0
Na	16	1198	164	3203	1047	98
Si	4	69	87	0	101	80
Sr	2	0	0	0	3	4
Cu	2	0	0	0	0	0
anorg C	6	232	63	494	0	0
NH ₄	0	0	0	1	0	0
SO ₄	1128	4293	5355	1702	33	9756
Cl	97	782	650	5350	2847	110
NO ₃	106	1870	230	294	38	44
PO ₄	6	0	0	2	0	0

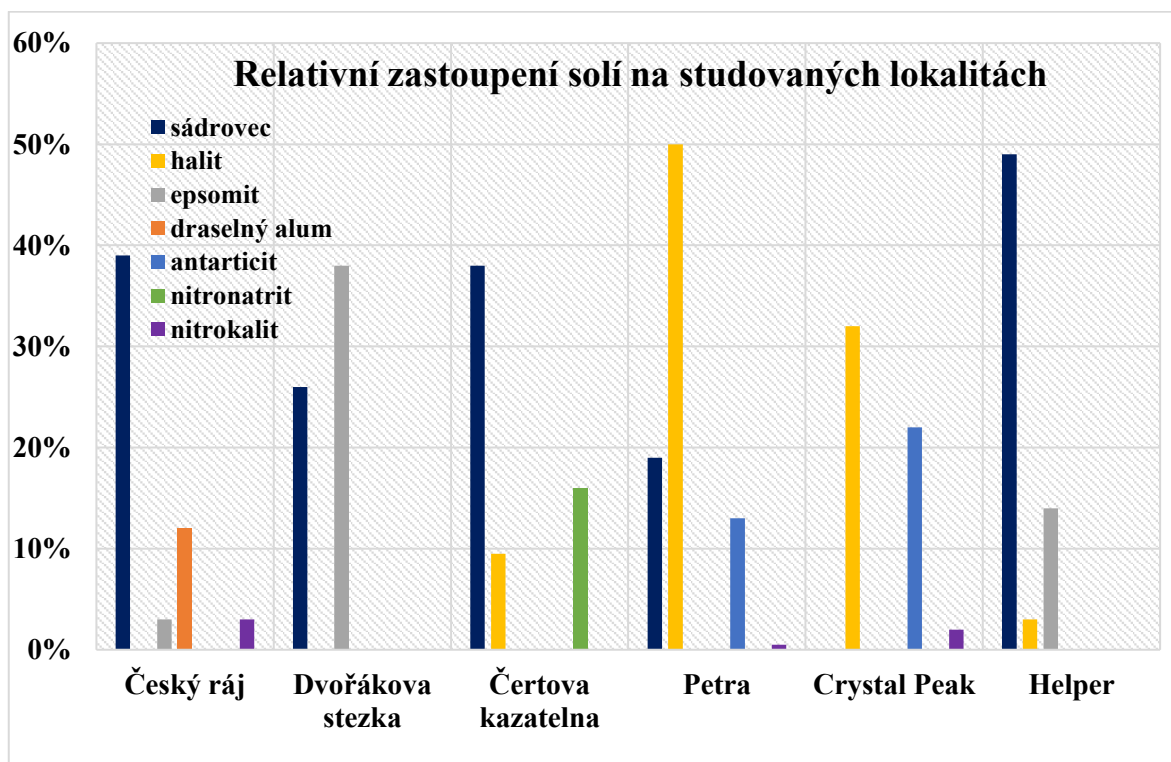
Tabulka 5.38: Průměrné hodnoty koncentrací všech studovaných iontů na všech studovaných lokalitách.

PRŮMĚR [ppm]	Český ráj	Čertova kazatelna	Dvořáková stezka	Petra	Crystal Peak	Helper
Al	130	0	6	33	4	3
Ca	395	2041	3435	4789	1472	5476
Fe	25	3	11	42	0	0
K	187	37	412	189	183	114
Mg	21	381	939	207	540	1185
Mn	30	0	2	1	0	0
Na	24	1170	264	23014	3553	330
Si	5	61	86	0	195	78
Sr	2	0	0	0	12	6
Cu	9	0	0	0	0	0
anorg C	6	61	77	486	225	129
NH ₄	0	0	0	0	0	0
SO ₄	2206	3907	12127	7529	557	16390
Cl	96	891	693	39443	9091	572
NO ₃	166	1831	299	784	781	277
PO ₄	8	0	0	38	0	0

Na grafech na obrázcích 5.14 (varianta a) a 5.15 (varianta b) jsou vyneseny průměrné procentuální zastoupení nejvýznamnějších solí na studovaných lokalitách. Nejvyšší obsahy solí jsem stanovila na lokalitě Petra, kde dominuje halit s průměrným relativním zastoupením 50 hm. %. Halit se hojně vyskytuje i na lokalitě Crystal Peak a to s 32 hm. % v průměru ze všech vzorků analyzovaných na této lokalitě. Dále se halit pravděpodobně tvoří i na lokalitě Čertova kazatelna s 8 – 11 hm. % v průměru. Tato lokalita se nachází v humidním klimatu České republiky, je však osluněná a i na podzim zde klesá relativní vlhkost pod kritickou hodnotu 75,5 %. Sádrovec dominuje na lokalitě Helper, kde tvoří 49 hm. % v průměru, dále je hojně zastoupen na lokalitách v Českém ráji a okolí (39 hm. % v průměru), na Čertově kazatelně (38 hm. % v průměru) a na lokalitách na Dvořákově stezce (26 hm. % v průměru). Minerály síranu hořečnatého dominují na lokalitách na Dvořákově stezce (38 hm. % v průměru). Na lokalitách na Dvořákově stezce a na lokalitě Helper se pravděpodobně bude tvořit i minerál polyhalit ($K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$) nebo syngenit $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$. Na aridních lokalitách Petra a Crystal Peak nevylučuji přítomnost minerálu antarkticitu, který se tvoří, pouze pokud klesá relativní vlhkost prostředí pod 30,8 %. V Českém ráji a okolí se jako na jediné ze studovaných oblastí vyskytují hlinité soli – alумы s 12 hm. % v průměru. To je dáno díky souběhu dvou faktorů – jednak díky extrémně kyselým atmosférickým srážkám v minulosti a zároveň velmi malé pufrací schopnosti prostředí. Na lokalitě Čertova kazatelna se v relativně vysokých koncentracích vyskytuje dusičnanový minerál nitronatrit, což může být způsobeno tím, že zde dochází k prosakování vody z kanalizace a zároveň je zde nízká relativní vlhkost vzduchu umožňující srážení tohoto minerálu. Minerál nitrokalit (dusičnan draselný) jsem v minoritním množství stanovila na lokalitách v Českém ráji, Crystal Peak a v Petře.



Obrázek 5.14: Relativní zastoupení hlavních solí na studovaných lokalitách – varianta a).



Obrázek 5.15: Relativní zastoupení hlavních solí na studovaných lokalitách – varianta b).

6. Výsledky a diskuze fyzikálního modelování transportu roztoku

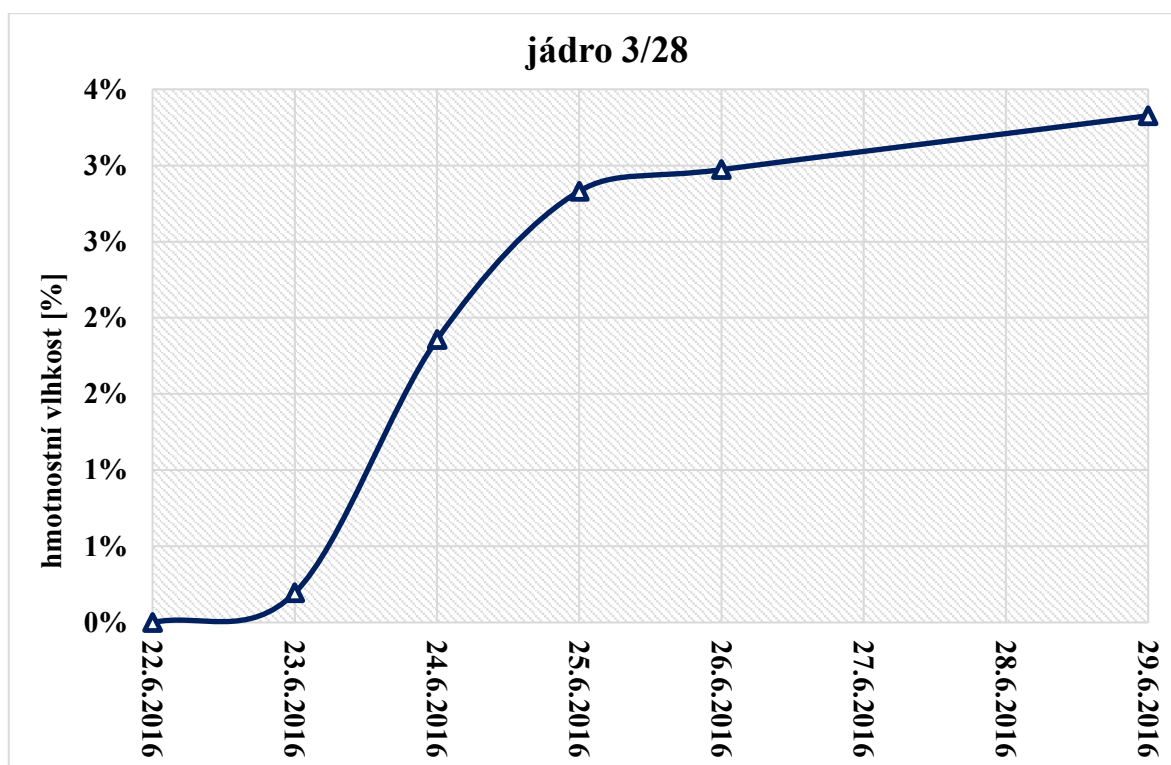
Na základě pokusů modelování kapilárního vztlínání roztoku do uměle vytvořené voštiny, uvádím pro shrnutí výsledky mého pozorování pro tři reprezentativními vzorky – jádra 3/28, 3/54 a 3/6, na kterých je dobře vidět, jak počáteční hladina roztoku v PVC trubce (kapilární výška) ovlivňuje transport roztoku do vzorku. Během těchto pokusů jsem již v průběhu experimentu nedoplňovala roztok fluoresceinu do PVC trubky na původní výšku a nechala jsem ho volně odpařovat.

6.1. Jádru 3/28

Pokus s jádrem 3/28 probíhal od 22. 6. 2016 do 28. 6. 2016. V tomto případě jsem roztok nalila do PVC trubky tak, aby kapilární výška na počátku experimentu byla 14 cm vůči bázi vzorku. Na snímcích na obrázku 6.1 je vidět postup roztoku fluoresceinu do pískovcového jádra. Na grafu na obrázku 6.2 je zobrazen nárůst hmotnostní vlhkosti jádra v průběhu experimentu.



Obrázek 6.1: Vývoj zbarvení jádra – jádro 3/28.



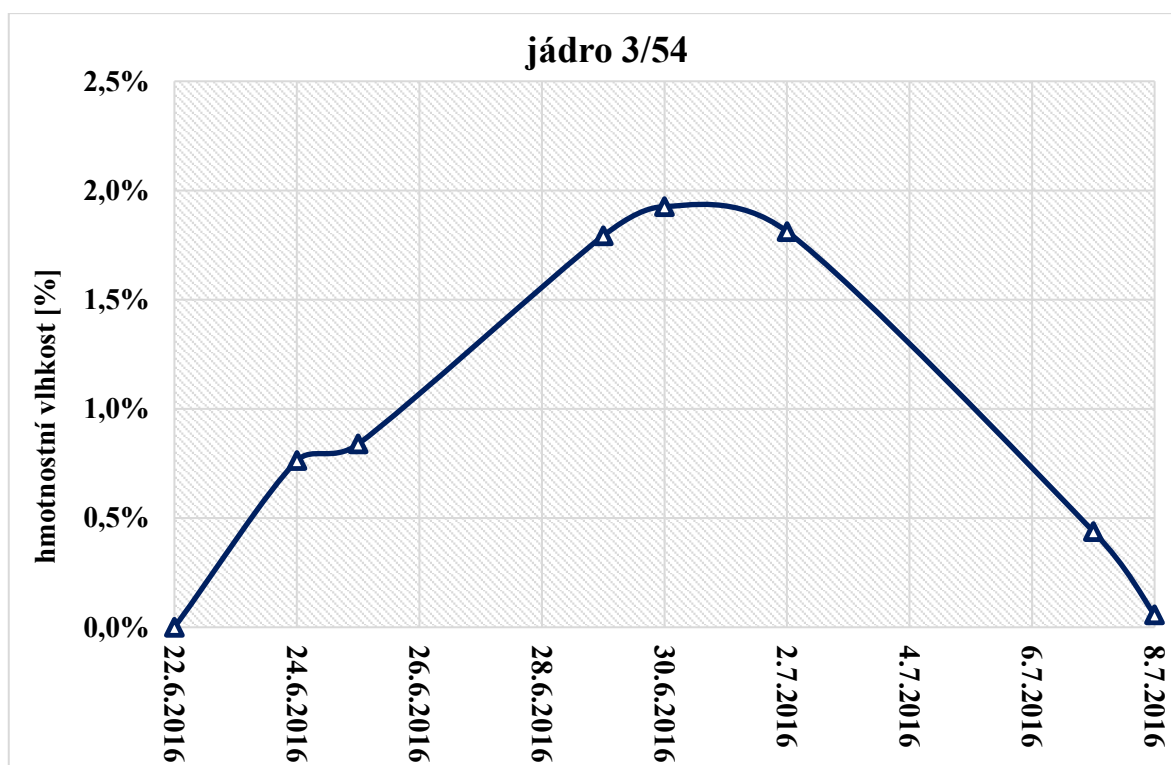
Obrázek 6.2: Vývoj hmotnostní vlhkosti v čase – jádro 3/28.

6.2. Jádro 3/54

Pokus s tímto jádrem probíhal od 22. 6. 2016 do 14. 7. 2016. V tomto případě byla počáteční kapilární výška 15 cm vůči bázi vzorku. Na snímcích na obrázku 6.3 je vyfoceno postupné zabarvování důlku voštiny a jeho okolí. Na grafu na obrázku 6.4 je zobrazen průběh hmotnostní vlhkosti jádra během experimentu a je zde vidět, že vzorek měl maximální vlhkost kolem dne 30. 6. 2016 a poté již docházelo k vysušování jádra, zřejmě díky přerušení kapilárního kontaktu vzorku s knotem (pruhem dětské pleny) způsobeném manipulací se vzorkem.



Obrázek 6.3: Vývoj zbarvení jádra – jádro 3/54.



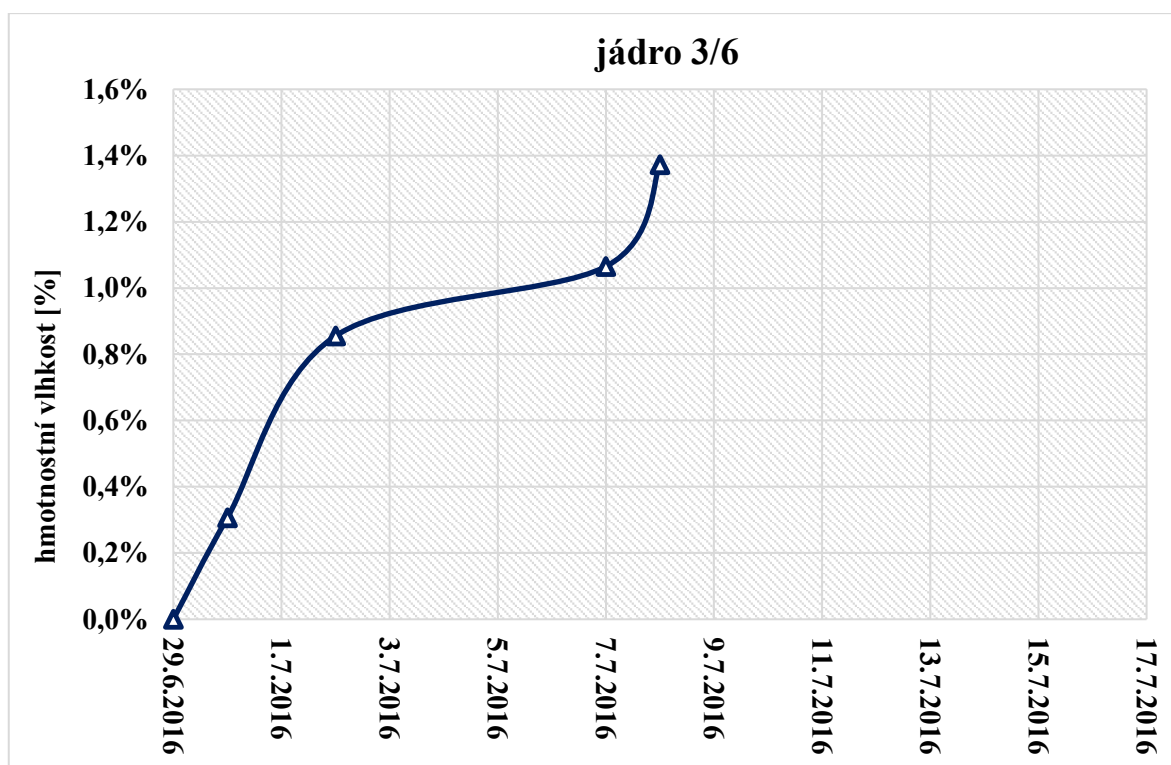
Obrázek 6.4: Vývoj hmotnostní vlhkosti v čase – jádro 3/54.

6.3. Jádro 3/6

Pokus s jádrem 3/6 probíhal od 29. 6. 2016 do 17. 7. 2016. V tomto případě byla stanovena počáteční kapilární výška 15,5 cm vůči bázi vzorku. Na grafu na obrázku 6.5 je zobrazen nárůst hmotnostní vlhkosti na začátku pokusu. V období od 8. 7. do 17. 7. 2016, jsem již neměla k dispozici váhu, proto je průběh experimentu po 8. 7. 2016 vyznačen pouze na fotkách na obrázku 6.6, kde je dobře vidět postup roztoku barviva fluoresceinu do důlku uměle vytvořené voštiny.



Obrázek 6.5: Vývoj zbarvení jádra – jádro 3/6.

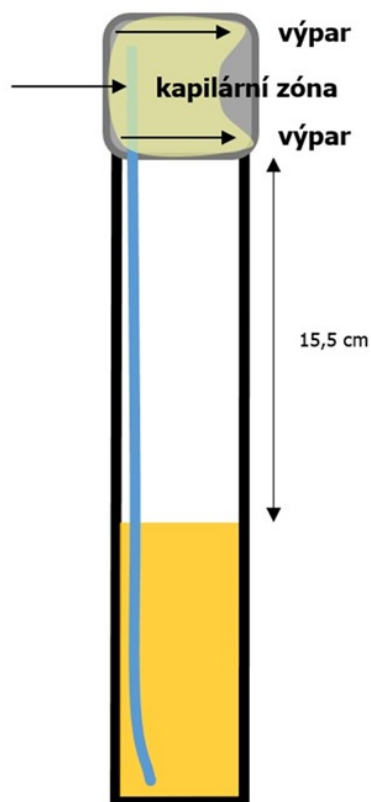


Obrázek 6.6: Vývoj hmotnostní vlhkosti v čase – jádro 3/6.

Na prvním jádře 3/28 je na snímcích pořízených během pěti dnů vidět rychlý postup roztoku a výrazné zbarvení jádra. Objevení barviva je zde pomalejší než u vzorku 3/54 a prosakuje nejdříve mimo důlek voštiny. Roztok se v tomto případě dostává nepravidelně na celý povrch vzorku. U jádra 3/54 je na fotkách zobrazen velmi rychlý nástup barviva do důlku voštiny. Kapilární výška je však dostatečně malá, a tak se roztok dostává i mimo důlek. Nejdříve se objevuje v levé horní části vzorku, později i dole uprostřed. V průběhu experimentu dochází k ustálení zbarvení a v konečné fázi pokusu se již zbarvení výrazně nemění (což je pravděpodobně dáno přerušením kontaktu pruhu látky se vzorkem). U jádra 3/6 jsem zvolila kapilární výšku jen o 0,5 cm vyšší než u vzorku 3/54 a roztok se již dostává pouze do důlku voštiny (a lehce prosakuje i mimo důlek v jeho spodní části). Následně jsem provedla ještě pokus s jádrem 43/3, u které byla počáteční kapilární výška 15 cm vůči bázi vzorku. Toto jádro bylo umístěno v závěsné aparatuře v období od 21. 9. 2016 do 2. 11. 2016. Během této doby se zbarvila pouze zadní strana jádra a roztok se již nedostal na přední stranu vzorku ani do důlku uměle vytvořené voštiny.

Těmito pokusy jsem dospěla k závěru, že při dané kapilární výšce se roztok fluoresceinu dostává pouze do důlku voštiny. To potvrzuje i výsledky měření provedené Svobodovou (2015) a teorií Huininka et al. (2004) zmíněnou podrobněji v kapitole 2.3., která

říká, že při nižším obsahu vlhkosti se kapilární fronta nachází při dnech důlků voštin a hřebítky zůstávají suché. Modelová situace pokusu s kritickou hodnotou naměřené kapilární výšky je znázorněna na obrázku 6.7. Tento model však platí pouze pro případ, kdy dochází k postupnému zvlhčování a saturaci vzorku, tedy pro zvlhčovací větev retenční křivky.



Obrázek 6.7: Model pokusu s kritickou hodnotou kapilární výšky.

7. Závěr

Ve své práci jsem se zaměřila na analýzu výluhů vzorků odebraných z přípovrchové zóny horniny, jejichž chemické složení dává poměrně dobrou představu o obsahu solí rozpustných v destilované vodě vyskytujících se na dané lokalitě. Celkem jsem loužila 283 vzorků, z toho bylo 141 vzorků analyzováno. U všech loužených vzorků jsem na základě regrese z naměřených hodnot konduktivity vypočítala celkový obsah solí v daném vzorku a u všech analyzovaných vzorků jsem stanovila procentuální zastoupení jednotlivých solí v daném výluhu. Nevýhodou loužící metody je, že jsou minerální fáze určovány nepřímo ze zastoupení jednotlivých iontů, interpretace výsledků analýz výluhů tedy obsahuje různé varianty složení solí. K interpretaci srážených solí jsem využila údaje o relativní vlhkosti vzduchu z čidel umístěných na studovaných lokalitách.

Vzorky byly odebírány na šesti různých lokalitách s různým klimatem a litologií. Tři lokality se nachází v České republice v prostředí humidního klimatu a tři lokality v zahraničí v prostředí aridního klimatu – dvě lokality ve státě Utah v USA a jedna lokalita v Petře v Jordánsku. Litologicky se jednalo o pískovce, arkózy či tufy, tedy o porézní horniny, které umožňují transport roztoků a v nich rozpuštěných solí.

Na většině studovaných lokalit se vyskytují minerály tvořené sírany, které jsou stabilní za vysoké relativní vlhkosti. Halit dominuje v aridním klimatu na lokalitě Petra a v menší míře i na lokalitě Crystal Peak. Tvoří se (pravděpodobně pouze přechodně) i na lokalitě Čertova kazatelna v humidním klimatu České republiky, která je vystavena přímému slunečnímu svitu. Na Čertově kazatelně jsem stanovila vysoké koncentrace iontů tvořících minerál nitronatrit, který se zde sráží pravděpodobně díky prosakování vody z kanalizace a zároveň nízké relativní vlhkosti prostředí. Zajímavé je také lokální specifikum oblasti Českého ráje a okolí, kde se jako na jediné lokalitě vyskytují alумы, tedy soli s obsahem hliníku. Zásadní vliv na přítomnost solí mají podmínky prostředí, hlavně relativní vlhkost a její časté oscilace kolem hodnot rovnovážné relativní vlhkosti. Proto je výskyt solí v aridním klimatu obecně vyšší a solné zvětrání efektivnější.

Na lokalitách v Českém ráji jsem porovnávala obsah solí mezi hřbítky a důlky jednotlivých voštin, na lokalitách na Dvořákově stezce pak obsah solí mezi vnějšími a vnitřními částmi jednotlivých tafone. U voštin jsem stanovila obecně více solí na jejich vnějších částech (hřbítcích), v tafoni naopak na vnitřních stěnách. Naměřený obsah solí ze vzorků odebraných z různých hloubkových intervalů na lokalitě Crystal Peak směrem do

hloubky klesá, na lokalitě Helper naopak směrem do hloubky roste. Na lokalitě Čertova kazatelna jsem se zaměřila na změnu obsahu solí v průběhu roku, přičemž nejméně solí se zde vyskytuje v zimě, kdy má studovaný převis nejvyšší vlhkost.

Na základě pozorování kapilárního vzlínání při pokusech s uměle vytvořenými voštinami, jsem dospěla k závěru, že počáteční výška kapilárního vzlínání je rozhodující pro způsob transportu roztoku a že při určité kapilární výšce (při mých pokusech 15,5 cm od báze vzorku) se roztok dostává pouze do důlku voštiny, zatímco hřebítka zůstávají suché.

8. Použitá literatura

- Adamovič, J., Mikuláš, R., Schweigstillová, J., Böhmová, V., 2011. Porosity changes induced by salt weathering of sandstones, Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 8: 29 – 45.
- Al-Khashman, O. A., 2005. Ionic composition of wet precipitation in the Petra region, Jordan. *Atmospheric Research* 78: 1 – 12.
- Al-Khashman, O. A., 2007. Study of water quality of springs in Petra region, Jordan: a three-year follow-up. *Water Resources Management* 21: 1145 – 1163.
- Arnold, A., Zehnder, K., 1990. Salt weathering on monuments. In *First International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, ed. F.Zezza. Brescia: Grafo. 31–58.
- Broggi, A., Petrucci, E., Bracciale, M. P., Santarelli, M. L., 2012. FT-Raman spectroscopy for quantitative analysis of salt efflorescences. *Journal of Raman Spectroscopy* 43: 1560 – 1566.
- Bruthans, J., Světlík, D., Soukup, J., Schweigstillová, J., Válek, J., Sedláčková, M., Mayo, A. L., 2012. Fast evolving conduits in clay-bonded sandstone: Characterization, erosion processes and significance for origin of sandstone landforms. *Geomorphology* 177: 178 – 193.
- Bruthans, J., Soukup, J., Vaculíková, J., Filippi, M., Schweigstillová, J., Mayo, A. L., Mašín, D., Kletetschka, G., Řihošek, J., 2014. Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion. *Nature Geoscience* 7: 597 – 601.
- Bruthans, J., Filippi, M., Schweigstillová, J., Řihošek, J., 2017. Quantitative study of a rapidly weathering overhang developed in artificially wetted sandstone cliff. *Earth Surface Processes Landforms* 42: 711 – 723.
- Bruthans, J., Filippi, M., Slavík, M., Svobodová, E., 2017. Origin of honeycombs: testing the hydraulic and case hardening hypotheses. *Geomorphology* – v revizi.
- Charola, A. E., 2000. Salts in the deterioration of the porous materials: an overview. *Journal of the American Institute for Conservation* 39: 327 – 343.
- Chlupáč, I., 1999. *Vycházky za geologickou minulostí Prahy a okolí*, Academia, 2. upravené vydání, Praha, 183 – 190.
- Delmonaco, G., Margottino, C., Spizzichino, D., 2013. Slope dynamic, monitoring and geological conservation of the Siq of Petra (Jordan). *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites*, CRC Press, 325 – 334.
- Dunn, D. E., 1959. *Geology of the Crystal Peak Area, Millard County, Utah*. Master's thesis, Southern Methodist University.
- Flatt, R. J., 2002. Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated. *Journal of Crystal Growth* 242: 435 – 454.
- Goudie, A. S., 2013. *Arid and Semi-Arid Geomorphology*. Cambridge University Press.

- Heinrichs, K., 2008. Diagnosis of weathering damage on rock-cut monuments in Petra, *Environmental Geology* 56: 643 – 675.
- Hintze, L. F., 1988. Geologic History of Utah. Department of Geology, Brigham Young University, 53 – 59.
- Huinink, H. P., Pel, L., Kopinga, K., 2004. Simulating the growth of tafoni. *Earth Surface Processes and Landforms* 29: 1225 – 1233.
- Käss, W., 1998. Tracing technique in geohydrology, Rotterdam, Balkema, 581 p.
- Lombardo, T., Doehme, E., Simon, S. T., 2004. The response of NaCl and Umm Ishrin sandstone to humidity cycling: mechanisms of salt weathering. In: Kwiatkowski, D., Lofvendahl, R., (Eds). *Proceedings of the 10th international congress on deterioration and conservation of stone*, Stockholm, June 27 – July 2, 2004 vol I. ICOMOS, Sweden, 203 – 210.
- Matsukura, Y., Tanaka, Y., 2000. Effect of rock hardness and moisture content on tafoni weathering in the granite of Mount Doeg-sung, Korea. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 82A: 59 – 67.
- McBride, E. F., Picard, M. D., 2000. Origin and development of tafoni in Tunnel Spring Tuff, Crystal Peak, Utah, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 869 – 879.
- Mikuláš, R., 2001. Gravity and orientated pressure as factors controlling “honeycomb weathering” of the Cretaceous castellated sandstones northern Bohemia, Czech Republic. *Bulletin of the Czech Geological Survey* 76: 217 – 226.
- Mikuláš, R., 2007. Microforms of the sandstone relief. In Härtel H., Cílek, V., Herben, T., Jackson, A., Williams, R., (Eds). *Sandstone landscape*, Academia, Prague, 66 – 75.
- Mottershead, D., Pye, K., 1994. Tafoni on coastal slopes, south Devon, UK. *Earth Surface Process Landform*. 19: 543 – 563.
- Mustoe, G. E., 1982. The origin of honeycomb weathering. *Geological Society of America Bulletin* 93: 108 – 115.
- Opluštil, S., Martínek, K., Tasáříová, Z., 2005. Facies and architectural analysis of fluvial deposits of the Nýřany Member and the Týnec Formation (Westphalian D-Barruelian) in the Kladno-Rakovník and Pilsen basins. *Bulletin of Geosciences* 80: 45 – 66.
- Paradise, T. R., 2013. Tafoni and other rock basins. In: Shroder, J. F., (Ed). *Treatise on Geomorphology*. San Diego: Academic Press 4: 111 – 126.
- Přikryl, R., Melounová, L., Vařilová, Z., Weishauptová, Z., 2007. Spatial relationships of salt distribution and related physical changes of underlying rocks on naturally weathered sandstone exposures (Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic). *Environmental Geology* 52: 409 – 420.
- Robinson, D. A., Williams, R. B. G., 2000. Experimental weathering of sandstone by combinations of salts. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 1309 – 1315.
- Rodriguez-Navarro, C., Doehme, E., Sebastian, E., 1999. Origins of honeycomb weathering: The role of salts and wind. *Geological Society of America Bulletin* 111: 1250 – 1255.

- Ruedrich, J., Siegesmund, S., 2007. Salt and ice crystallisation in porous sandstones. *Environmental Geology* 52: 225 – 249.
- Řihošek, J., Bruthans, J., Mašín, D., Filippi, M., Carling, G. T., Schweigstillová, J. 2016. Gravity-induced stress as a factor reducing decay of sandstone monuments in Petra, Jordan. *Journal of Cultural Heritage* 19: 415 – 425.
- Schweigstillová, J., Hradil, D., 2007. Salt Formation on the Cretaceous Sandstone in North and Northwest Bohemia (Czech Republic) – In: Härtel H., Cílek V., Herben T., Jackson A. and Williams R. B. G.(eds.): *Sandstone Landscapes*. Academia, Prague 76 – 79.
- Schweigstillová, J., 2009. Origin of sulphate efflorescence from sandstone of the Bohemian Cretaceous Basin. *Acta Research Reports* 18: 75 – 78.
- Slavík, M., 2014. Propustnost přírodních povrchů hruboskalského pískovce ve skalních městech pro vodní páru a intenzita výparu – Diplomová práce, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky PřF UK, Praha.
- Steiger, M., Asmussen, S., 2008. Crystallization of sodium sulphate phases in porous materials: the phase diagram $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ and generation of stress. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72: 4291 – 4306.
- Steiger, M., Charola, A. E., Sterflinger, K., 2012. Weathering and deterioration. In: *Stone in Architecture: Properties, Durability*, Siegesmund S, Snethlage R (eds). Springer Verlag: Berlin; 227 – 316.
- Steven, T. A., 1989. Geologic map of the Crystal Peak Caldera, west-central Utah. U. S. Geological Survey Miscellaneous Investigation Series, Map I-2002.
- Strijker, G., Bertotti, G., Luthi, S. M., 2012. Multi-scale fracture network analysis from an outcrop analogue: a case study from the Cambro-Ordovician clastic succession in Petra, Jordan. *Marine and Petroleum Geology* 39: 104 – 106.
- Svobodová, E., 2015. Vlhkost a její transport v přípovrchové zóně kvádového pískovce. Diplomová práce, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky PřF UK, Praha.
- Turkington, A. V., Phillips, J. D., 2004: Cavernous weathering, dynamical instability and self-organization. *Earth Surface Processes and Landforms* 29: 665 – 675.
- Turkington, A. V., Paradise, T. R., 2005. Sandstone weathering: a century of research and innovation. *Geomorphology* 67: 229 – 253.
- Uličný, D., 2001. Depositional systems and sequence stratigraphy of coarse-grained deltas in a shallow-marine, strike-slip settings: the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. *Sedimentology* 48: 599 – 628.
- Vařilová, Z., Navrátil, T., Dobešová, I., 2011. Recent Atmospheric Deposition and its Effects on Sandstone Cliffs in Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic. *Water Air and Soil Pollution* 220: 117 – 130.
- Vítek, J., 1987. Pseudokrasové tvary v karbonských sedimentech sz. od Plzně. *Český kras* 38: 125 – 127.

Wederkind, W., Ruederich, J., 2013. Salt-weathering, conservation techniques and strategies to protect the rock cut facades in Petra/Jordan In: Fort, R., Álvarez de Buergo, M., Gomez-Heras, M., Vazquez-Calvo C., (Eds.), Heritage, weathering and conservation, Taylor & Francis, London 261 – 268.

Williams, R. B. G., Robinson, D. A., 1998. Weathering of sandstone by alunogen and alum salts. Quarterly Journal of Engineering Geology 31: 369 – 373.

Internetové zdroje:

http://mapy.geology.cz/geocr_50/, 27. 6. 2017

<https://mapy.cz/>, 8. 8. 2017

<https://www.google.cz/maps>, 8. 8. 2017

9. Příloha 1. Seznam všech loužených vzorků na lokalitě Čertova kazatelna

Tabulka 9.1: Seznam všech loužených vzorků, hodnoty konduktivity, celkové mineralizace a obsahu solí z lokality Čertova kazatelna.

název vzorku	datum odběru vzorku	datum filtrace vzorku	konduktivita [μS/cm] měřená po 12 h loužení	konduktivita [μS/cm] měřená 26. 3. 15	TDS anal. vzorků	TDS dopočítaná pomocí regrese	hm. %
P1	28.10.13	5.11.14	219	230	193	143	1,43
P2	28.10.13	5.11.14	335	366	182	219	2,19
P3 I.	28.10.13	5.11.14	222	244	132	145	1,45
P3 II.	28.10.13	5.11.14	242	266	152	159	1,59
P4	28.10.13	5.11.14	277	308	144	181	1,81
P5 I.	28.10.13	5.11.14	209	218	180	137	1,37
P5 II.	28.10.13	5.11.14	129	146	93	84	0,84
P6	28.10.13	5.11.14	23	28	34	15	0,15
P STR	28.10.13	5.11.14	371	419	194	243	2,43
P1	2.12.13	-	165	-	-	108	1,08
P2	2.12.13	-	69	-	-	45	0,45
P3 I.	2.12.13		25	-		17	0,17
P3 II.	2.12.13	-	98	-	-	64	0,64
P4	2.12.13	-	34	-	-	22	0,22
P5	2.12.13	-	12	-	-	8	0,08
P6	2.12.13		11	-		7	0,07
P1 II	25.12.13	-	70	72	-	46	0,46
P1 I	25.12.13	-	92	97	-	60	0,60
P2	25.12.13	-	23	26	-	15	0,15
P3 I.	25.12.13	-	12	16	-	8	0,08
P3 II.	25.12.13	-	56	58	-	36	0,36
P4	25.12.13	-	22	24	-	14	0,14
P5 II.	25.12.13	-	10	12	-	7	0,07
P6	25.12.13	-	12	14	-	8	0,08
P7	25.12.13	-	21	26	-	14	0,14
P1	1.2.14	-	40	-	-	26	0,26
P1 I	1.2.14	-	14	-	-	9	0,09
P2	1.2.14	-	28	-	-	18	0,18
P3 I	1.2.14	-	24	-	-	16	0,16
P3 II	1.2.14	-	23	-	-	15	0,15
P4	1.2.14	-	23	-	-	15	0,15
P5 II.	1.2.14	-	16	-	-	11	0,11
P6	1.2.14	-	18	-	-	12	0,12
X1	1.2.14	5.11.14	398	-	262	261	2,61

U dubu horní	1.2.14	5.11.14	537	-	272	352	3,52
U dubu spodní	1.2.14	5.11.14	1264	-	794	828	8,28
P1 I	8.3.14	18.3.15	36	36	-	24	0,24
P1 II	8.3.14	-	41	41	-	27	0,27
P2 II.	8.3.14	-	96	96	-	63	0,63
P3A	8.3.14	-	39	39	13	26	0,26
P3I.	8.3.14	-	45	45	-	29	0,29
P4	8.3.14	-	48	50	-	31	0,31
P5 II.	8.3.14	-	72	74	-	47	0,47
P6	8.3.14	18.3.15	17	16	3	11	0,11
P7	8.3.14	-	30	29	-	20	0,20
P1 I	11.5.14	-	121	-	-	79	0,79
P1 II	11.5.14	-	78	-	-	51	0,51
P2 I	11.5.14	-	206	-	-	135	1,35
P2 II.	11.5.14	-	159	-	-	104	1,04
P3 I.	11.5.14	-	208	-	-	136	1,36
P3 II.	11.5.14	-	193	-	-	126	1,26
P4	11.5.14	-	226	-	-	148	1,48
P5 II.	11.5.14	-	144	-	-	94	0,94
P6	11.5.14	-	50	-	-	33	0,33
U dubu horní	11.5.14	18.2.15	1040	-	664	681	6,81
U dubu spodní	11.5.14	18.2.15	1608	-	1113	1054	10,54
P1 I	11.5.14	-	162	170	-	106	1,06
P1 II	11.5.14	-	298	301	-	195	1,95
P2	11.5.14	-	149	158	-	98	0,98
P4	11.5.14	-	112	119	-	73	0,73
P5	11.5.14	-	59	68	-	39	0,39
P6	11.5.14	-	59	63	-	39	0,39
P7	11.5.14	-	184	188	-	121	1,21
P0 jíl	11.5.14	-	106	113	-	69	0,69
U dubu horní	11.5.14	-	508	506	-	333	3,33
U dubu spodní	11.5.14	-	301	301	-	197	1,97
P1 I	24.5.14	-	327	-	-	214	2,14
P2 II.	24.5.14	-	168	-	-	110	1,1
P4	24.5.14	-	145	-	-	95	0,95
P0 jíl	24.5.14	-	56	-	-	37	0,37
10m od převisu plotna vpravo	24.5.14	25.2.15	470	-	297	308	3,08
převis krusta sole	24.5.14	25.2.15	607	-	402	398	3,98
P1 I	2.7.14	-	171	-	-	112	1,12
P2 II.	2.7.14	-	137	-	-	90	0,9
P3 I.	2.7.14	-	179	-	-	117	1,17
P5 II.	2.7.14	-	112	-	-	73	0,73
P6	2.7.14	-	95	-	-	62	0,62

U dubu	2.7.14	-	321	-	-	210	2,1
P1 I	16.8.14	25.2.15	281	287	161	184	1,84
P1 II	16.8.14	25.2.15	149	155	81	98	0,98
P2 I.	16.8.14	-	128	133	-	84	0,84
P2 II.	16.8.14	-	106	112	-	69	0,69
P3	16.8.14	-	47	49	-	31	0,31
P4	16.8.14	-	142	152	-	93	0,93
P5	16.8.14	-	73	80	-	48	0,48
P7	16.8.14	25.2.15	245	258	137	161	1,61
P0 jíl	16.8.14	-	82	91	136	54	0,54
P6	16.8.14	-	54	61	-	35	0,35
U dubu horní	16.8.14	25.2.15	302	305	170	198	1,98
U dubu spodní	16.8.14	25.2.15	1273	1273	875	834	8,34
P1	25.12.14	-	130	-	-	85	0,85
P2 I.	25.12.14	-	150	-	-	98	0,98
P2 II.	25.12.14	-	110	-	-	72	0,72
P3	25.12.14	-	30	-	-	20	0,2
P4	25.12.14	-	20	-	-	13	0,13
P5	25.12.14	-	19	-	-	12	0,12
P6	25.12.14	-	9,5	-	-	6	0,06
U dubu horní	25.12.14	-	434	-	-	284	2,84
U dubu spodní	25.12.14	-	845	-	-	554	5,54
P0 jíl	25.12.14	-	78	-	-	51	0,51
P1 I.	14.3.15	-	394	-	-	258	2,58
P1 II.	14.3.15	-	305	-	-	200	2
P2 II.	14.3.15	-	100	-	-	66	0,66
P3	14.3.15	-	30	-	-	20	0,2
P4	14.3.15	-	120	-	-	79	0,79
P5	14.3.15	-	30	-	-	20	0,2
P6	14.3.15	-	11	-	-	7	0,07
P7	14.3.15	-	35	-	-	23	0,23
U dubu horní	14.3.15	-	855	-	-	560	5,6
U dubu spodní	14.3.15	-	314	-	-	206	2,06
10 m od převisu plotna vpravo	14.3.15	-	44	-	-	29	0,29
Opadlá šupina 2013	-	-	9	11	-	6	0,06
Opadlá šupina 3/2015	-	-	18	18	-	12	0,12

10. Příloha 2. Výsledky chemických analýz na studovaných lokalitách

Tabulka 10.1: Výsledky chemických analýz z lokalit v Českém ráji.

název	Al 396,152 nm ppm	Cu rad 317,933 nm ppm	Fe 259,940 nm ppm	K rad 766,491 nm ppm	Mg rad 279,553 nm ppm	Mn 257,610 nm ppm	Na 589,592 nm ppm	S 181,972 nm ppm	Si 212,412 nm ppm	Sr 407,771 nm ppm	Cu 213,598 nm ppm	anorg uhlik mg C v litru roztoku	SO ₄ , mg/L vypocten ze S	ppm Cl	ppm NO ₃	PO ₄ 213,618 nm ppm
blank	0,00	0,06	0,00	0,07	0,02	0,00	0,05	0,09	0,00	0,00	0	>	0,27	0,1	0,0	0,00
H2 Mladějov 1	0,74	1,30	0,80	0,80	0,16	0,13	0,56	3,08	0,03	0,01	0,5633	0,03	9,24	2,2	2,7	0,00
D2 Mladějov 1	0,04	0,98	0,06	0,32	0,02	0,03	0,09	0,97	0,05	0,01	0,0093	>	2,91	1,5	0,0	0,00
H3 Mladějov 1	0,38	3,22	0,85	1,45	0,10	0,07	0,53	4,66	0,03	0,01	0,0706	>	13,98	1,3	1,4	0,07
H6 Mladějov 1	1,24	12,35	1,94	1,56	0,70	0,74	0,45	17,30	0,04	0,06	1,1542	>	51,9	0,2	1,7	0,06
D6 Mladějov 1	0,35	3,85	0,24	0,44	0,12	0,13	0,13	4,57	0,02	0,02	0,0425	>	13,71	1,7	0,5	0,00
H7 Mladějov 1	1,00	4,10	0,04	2,32	0,42	0,37	0,43	5,88	0,06	0,02	0,0608	>	17,64	1,4	5,2	0,00
D7 Mladějov 1	0,17	3,00	0,04	0,81	0,18	0,15	0,23	3,14	0,06	0,02	0,0219	>	9,42	1,2	2,6	0,00
H8 Mladějov 1	0,13	3,24	0,11	1,44	0,15	0,20	0,23	3,90	0,07	0,02	0,2732	>	11,7	1,0	2,3	0,05
H9 Mladějov 1	0,08	2,11	0,02	1,17	0,05	0,07	0,14	2,46	0,04	0,01	0,0335	0,004	7,38	0,9	0,9	0,00
H10 Mladějov 1	0,03	7,07	0,47	1,00	0,09	0,14	0,27	6,72	0,07	0,04	0,0575	>	20,16	0,9	1,4	0,10
H12 Mladějov 2	0,03	1,41	0,03	1,03	0,06	0,03	0,16	1,80	0,05	0,01	0,0122	>	5,4	0,6	0,0	0,26
H13 Mladějov 2	0,05	0,62	0,06	1,52	0,17	0,07	0,24	1,20	0,07	0,00	0,0416	>	3,6	0,9	0,0	0,17
D13 Mladějov 2	0,02	2,56	0,04	0,24	0,02	0,01	0,07	2,27	0,17	0,01	0,0081	>	6,81	2,3	0,0	0,04
D14 Mladějov 2	0,02	2,08	0,02	0,27	0,03	0,02	0,09	2,06	0,20	0,01	0,0119	>	6,18	0,5	0,0	0,15
H15 Mladějov 2	0,07	0,46	0,09	1,54	0,18	0,08	0,28	1,31	0,06	0,00	0,0058	>	3,93	1,0	0,0	0,13
D15 Mladějov 2	0,02	4,43	0,10	0,52	0,05	0,03	0,11	4,05	0,19	0,02	0,0177	>	12,15	1,2	0,0	0,08
H16 Mladějov 2	0,09	2,30	0,02	0,49	0,09	0,07	0,15	2,60	0,02	0,01	0,0207	>	7,8	0,9	0,7	0,06
D16 Mladějov 2	0,04	4,12	0,03	0,48	0,09	0,07	0,20	3,93	0,05	0,02	0,0948	>	11,79	1,0	0,9	0,00
H17 Mladějov 2	0,18	8,85	0,02	1,64	0,29	0,30	0,14	8,32	0,02	0,03	0,0711	>	24,96	1,2	5,1	0,24
D17 Mladějov 2	0,03	3,66	0,02	0,31	0,06	0,06	0,09	3,34	0,02	0,01	0,0269	>	10,02	1,0	0,0	0,05
H18 Mladějov 2	0,07	3,70	0,25	0,64	0,13	0,08	0,11	3,76	0,05	0,02	0,0125	>	11,28	0,6	1,1	0,05
D19 Mladějov 2	0,04	1,61	0,03	0,25	0,02	0,01	0,08	1,80	0,02	0,01	0,0088	>	5,4	0,3	0,0	0,11
H20 Mladějov 2	0,22	0,50	1,16	1,15	0,20	0,09	0,20	2,71	0,05	0,05	0,1255	0,13	8,13	0,7	0,9	0,00
H21 Mladějov 2	0,91	2,78	0,01	2,53	0,56	1,17	0,28	7,02	0,01	0,01	0,0433	>	21,06	1,3	4,3	0,10
H22 Mladějov 2	0,53	13,01	0,18	3,29	0,88	1,55	0,30	16,40	0,02	0,07	0,0679	>	49,2	0,3	5,3	0,20
H23 Mladějov 2	0,07	6,00	0,04	2,09	0,46	0,61	0,29	6,82	0,01	0,03	0,0025	>	20,46	1,2	5,2	0,45
D23 Mladějov 2	2,25	1,27	0,80	1,43	0,04	0,06	0,07	7,71	0,02	0,01	0,0463	0,05	23,13	1,2	0,3	0,06
H24 Mladějov 2	1,37	3,44	1,10	0,93	0,35	0,39	0,33	8,97	0,02	0,03	0,1229	>	26,91	0,1	4,5	0,00
D24 Mladějov 2	0,15	0,14	0,07	0,15	0,04	0,04	0,08	0,66	0,04	0,01	0,0211	>	1,98	0,0	0,0	0,10
H25 Mladějov 2	0,55	0,37	0,22	0,38	0,17	0,16	0,16	2,02	0,01	0,00	0,016	0,11	6,06	1,0	1,5	0,00
D25 Mladějov 2	0,03	2,03	0,11	0,14	0,03	0,03	0,09	2,15	0,14	0,01	0,0224	>	6,45	0,4	1,1	0,10
H26 Mladějov 2	7,06	3,53	0,08	11,10	0,28	0,45	0,33	21,85	0,02	0,04	0,0091	>	65,55	1,5	4,9	0,09
D26 Mladějov 2	25,88	27,62	0,19	23,10	0,09	0,15	0,32	82,60	0,02	0,20	0,0217	>	247,8	1,0	1,9	0,21
H27 Mladějov 2	0,03	3,44	0,35	0,15	0,03	0,04	0,12	3,34	0,07	0,02	0,0083	0,06	10,02	1,0	0,0	0,00
D28 Mladějov 2	0,16	1,93	0,02	0,35	0,07	0,22	0,11	2,42	0,03	0,01	0,0008	0,06	7,26	0,9	0,0	0,00
H29 Mladějov 2	0,03	2,43	0,28	0,25	0,02	0,08	0,08	2,54	0,06	0,02	0,0047	0,06	7,62	0,7	0,0	0,04
D29 Mladějov 2	1,55	2,51	0,24	3,60	0,33	0,47	0,55	6,54	0,03	0,02	0,0168	>	19,62	1,6	5,4	0,10
H30 Mladějov 2	0,31	3,65	0,05	1,32	0,13	0,18	0,29	4,46	0,02	0,03	0,0178	>	13,38	1,2	2,0	0,00
D30 Mladějov 2	3,36	7,31	0,43	1,90	1,48	3,19	0,78	18,75	0,04	0,06	0,1978	>	56,25	0,4	2,4	0,27
D30 Mladějov 2	0,34	0,29	0,07	0,35	0,16	0,31	0,11	1,75	0,05	0,01	0,0108	>	5,25	0,6	0,0	0,09

Tabulka 10.2: Výsledky chemických analýz z lokalit na Dvořákově stezce.

název	Al 396.152 nm ppm	Ca 422.673 nm ppm	Fe 259.940 nm ppm	K 766.491 nm ppm	Mg 279.553 nm ppm	Mn 257.610 nm ppm	Na 589.592 nm ppm	Si 288.158 nm ppm	IC v mg/L	siran ICP EOS ppm	chlorid argentome tr ppm	dusicnan, ppm	P 213.618 nm ppm
blank	0	0,04	0	0	0	0	0,04	0,02	<	0,96	<	0	0,01
K01	0,01	1,98	0,01	2,5	13,44	0,01	2,34	0,84	<	63,27	2,6	0,5	0
K02	0,07	1,03	0,04	2,64	1,42	0,02	1,5	0,88	0,366	4,41	<	2,9	0,01
K03	0	11,65	0,2	2,95	1,85	0,02	0,71	1,13	0,028	37,8	1,3	0,1	0
K05	0,05	2,32	0,1	3,59	13,17	0,03	1,64	0,57	<	53,55	6,5	7,2	0
K07	0,13	2,12	0,1	3,3	13,59	0,01	0,79	1,18	1,362	52,92	5,2	2,8	0
K10	0	2,27	0,01	1,4	8,47	0,01	0,58	0,62	<	38,34	2,6	0,7	0
K11	0,04	5,43	0,05	3,52	14,96	0,01	1,82	1,14	1,049	70,29	2,6	2,3	0,01
K12	0,05	1,02	0,09	10,61	12,26	0,02	11,05	0,62	0,873	48,39	16,9	1,6	0
K13	0,05	12,44	0,02	4,02	8,02	0,03	2	1,19	2,374	60,42	6,5	0,7	0,01
K14	0,07	62,79	0,11	7,04	8,99	0,01	4,26	0,84	1,811	193,92	9,1	6,4	0,04
K15	0,09	8,51	0,08	8,56	14,73	0,01	7,39	0,93	0,160	88,14	10,4	8,2	0,03
K16	0,13	1,08	0,50	2,20	0,42	0,01	0,20	0,87	1,027	2,85	<	0	0,01

Tabulka 10.3: Výsledky chemických analýz z lokality Čertova kazatelna.

název	Al3961	Ca3179	Fe2599	K7664	Mg2852	Mn2593	Na5895	Si2124	Inorg C mg/L	siran	chlorid	dusicnan	P1859
blank 1	0,09	6,21	0,01	0,00	0,01	0,01	0,06	0,10	4,83	0,15	0,05	0,05	0,05
blank 2	0,10	6,32	0,02	0,00	0,01	0,02	0,02	0,10	4,54	0,12	0,05	0,05	0,00
P1	0,08	36,51	0,02	0,16	4,49	0,02	5,66	0,90	15,67	47,87	4,72	12,85	0,06
P2	0,06	34,92	0,02	0,46	6,66	0,03	12,02	0,82	4,86	63,84	11,32	27,14	0,04
P3 I.	0,06	19,37	0,06	0,52	2,88	0,02	16,43	0,75	6,99	20,26	14,42	21,62	0,06
P3 II.	0,09	25,20	0,07	0,25	4,94	0,02	12,43	0,82	7,55	43,07	7,87	18,75	0,01
P4	0,06	28,78	0,02	0,47	4,04	0,01	11,70	0,74	3,27	49,39	11,50	20,57	0,13
P5 I.	0,09	27,80	0,07	0,51	2,23	0,01	15,45	0,79	14,77	35,26	6,47	16,32	0,02
P5 II.	0,09	14,21	0,03	0,19	1,51	0,02	8,52	0,12	7,00	14,75	6,42	11,24	0,05

Tabulka 10.4: Výsledky chemických analýz z lokality Petra.

název	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	siran	chlorid	dusicnan	P	NH ₄ ⁺ mg/l	anorg C mg/l
blank	0,133	2,95	0,010	0,003	0,006	0,01	0,09	0,00	0,00	0,00	0,102	0,000	1,51
AD I/1	0,141	70,84	0,010	0,163	1,450	0,004	592,169	27,54	1100	7,93	0,067	0,006	4,52
AD I/2	0,134	28,73	0,010	0,062	1,761	0,006	19,297	6,81	44	2,22	0,077	0,007	11,30
AD I/3	0,066	46,40	0,010	0,023	0,767	0,010	0,667	71,26	1	2,05	0,147	0,005	8,21
AD II/1	0,330	24,79	0,012	0,435	0,661	0,004	65,401	14,67	101	16,90	0,135	0,005	7,80
AD II/2	0,566	6,89	0,040	0,098	0,905	0,012	26,205	6,51	42	2,92	0,042	0,005	1,95
AD II/3	0,667	46,03	0,010	0,744	2,325	0,015	517,596	19,36	889	5,52	0,110	0,009	9,29
AD II/4	0,635	18,31	0,010	0,326	1,083	0,004	304,737	6,72	511	3,30	0,173	0,016	3,31
AD II/5	0,704	28,56	0,010	0,558	1,290	0,006	248,737	13,23	440	2,77	0,222	0,009	9,75
AD II/6	1,131	59,86	12,113	0,309	5,055	0,107	1322,797	33,29	2300	0,05	0,362	0,071	8,37
AD II/7	0,668	41,24	0,010	0,141	1,355	0,006	519,683	5,13	946	6,39	0,123	0,016	4,50
AD II/8	0,634	27,46	0,010	0,025	0,397	0,003	21,263	55,33	36	2,09	0,094	0,006	2,16
AD III/0	0,629	22,92	0,011	0,171	1,076	0,002	270,372	21,98	465	2,97	0,248	0,006	6,54
AD III/2	0,472	85,25	0,010	0,142	1,760	0,004	609,806	54,62	910	8,08	0,072	0,008	6,32
AD III/4	0,547	20,03	0,010	0,033	1,011	0,010	3,909	10,05	15	2,53	0,165	0,003	5,08
AD IV/1	0,486	11,49	0,010	0,018	0,621	0,014	30,574	6,26	52	0,05	0,238	0,006	6,48
P2	0,404	250,96	0,010	40,295	7,539	0,010	1468,069	672,00	2300	68,24	9,240	0,005	10,68
P4	0,483	114,90	0,010	8,782	4,936	0,008	33,485	334,71	55	15,49	0,539	0,006	7,15
P6	0,436	63,38	0,041	0,760	3,235	0,003	49,920	77,16	94	24,98	0,094	0,001	10,09
P7	0,308	17,28	0,010	0,013	0,439	0,000	0,183	5,54	3	0,05	0,134	0,001	8,06
K3	0,280	5,62	0,010	0,707	1,666	0,003	1,889	3,70	9	18,16	0,023	0,017	0,00
A1	0,365	34,13	0,010	0,358	3,030	0,002	63,422	36,51	113	6,97	0,010	0,001	4,47
A4	0,273	243,49	0,010	0,406	9,410	0,011	424,104	473,10	838	0,05	0,356	0,000	4,82
T1	0,482	28,88	0,010	0,015	1,005	0,002	4,397	24,20	19	1,54	0,122	0,003	6,03
T2	0,369	13,38	0,004	0,007	0,894	0,003	7,015	12,69	13	0,07	0,079	0,001	6,42
T3	0,429	14,10	0,017	0,031	1,649	0,026	7,335	14,03	18	5,32	0,128	0,005	4,67
T4	0,467	13,42	0,007	0,022	1,048	0,025	4,195	10,07	13	1,69	0,084	0,002	3,83
T5	0,449	16,57	0,040	0,025	0,522	0,004	18,378	8,97	34	0,02	0,097	0,000	8,02
T8	0,432	90,70	0,010	0,104	1,790	0,009	6,529	140,90	24	16,10	0,182	0,000	6,99

Tabulka 10.5: Výsledky chemických analýz z lokality Crystal Peak.

název	Al 396,152 nm ppm	Ca rad 317,933 nm ppm	Fe 259,940 nm ppm	Cu 327,395 nm ppm	K rad 766,491 nm ppm	Mg rad 279,553 nm ppm	Mn 257,610 nm ppm	Na rad 589,592 nm ppm	Si 212,412 nm ppm	Sr 407,771 nm ppm	ppm SO ₄ vypocteno ze S z ICP EOS	ppm Cl	ppm NO ₃	P 213,618 nm ppm	ammonium
blank	0,01	0,12	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,08	0,00	0,00	0,45	0,60	0,13	0,05	0,11
56/1Vv	0,03	7,03	0,00	0,00	1,47	1,00	0,00	1,43	3,02	0,02	0,42	1,0	0,2	0,01	0,10
56/1D	0,00	101,00	0,00	0,00	1,30	26,80	0,00	8,30	2,70	0,50	2,7	275,8	9,9	0,00	0,10
56/2D	0,10	3,90	0,00	0,00	6,30	0,90	0,00	141,00	3,90	0,00	4,5	169,4	104,3	0,10	0,10
56/6V	0,04	4,18	0,00	0,00	2,07	0,98	0,00	0,44	2,68	0,01	0,36	0,7	0,2	0,02	0,10
56/6D	0,10	24,40	0,00	0,00	3,80	9,20	0,00	222,30	1,30	0,20	21,9	464,4	18,7	0,00	0,09
56/5V	0,11	3,73	0,00	0,00	0,62	0,66	0,00	0,30	1,02	0,01	0,3	0,6	0,2	0,01	0,09
56/5D1	0,10	48,00	0,00	0,00	2,10	17,70	0,00	143,00	0,90	0,80	8,7	405,9	26,3	0,00	0,15
55B1	0,00	40,10	0,00	0,00	2,70	20,10	0,00	105,40	1,00	0,30	36,6	289,8	6,3	0,00	0,10
55B2	0,08	0,52	0,00	0,00	1,19	0,26	0,00	1,09	0,86	0,00	0,45	0,7	0,1	0,01	0,10
55AbD	0,00	23,20	0,00	0,00	0,95	12,25	0,00	27,35	0,50	0,20	24,15	98,0	1,4	0,00	0,10
55AbD	0,00	13,80	0,00	0,00	0,85	7,90	0,00	15,30	0,70	0,10	6,6	57,7	1,3	0,00	0,09
55AbD	0,03	7,54	0,00	0,00	0,97	3,16	0,00	11,18	0,82	0,04	1,02	35,9	0,5	0,02	0,09
55AbD	0,08	3,75	0,00	0,00	1,28	0,89	0,00	9,92	1,28	0,02	1,74	17,6	0,4	0,02	0,10
55AbV	0,02	1,25	0,00	0,00	0,58	0,51	0,00	0,35	0,77	0,01	0,27	0,5	0,1	0,03	0,09
55CV	0,03	5,67	0,00	0,00	1,83	1,46	0,00	2,72	4,54	0,03	0,18	0,8	0,2	0,02	0,09
55CV	0,09	3,55	0,01	0,00	1,83	0,72	0,00	3,11	5,24	0,02	0,21	0,7	0,3	0,03	0,11
55CV	0,07	3,49	0,00	0,00	2,04	0,60	0,00	3,50	4,47	0,02	0,21	0,7	0,4	0,02	0,09
55CV	0,12	2,49	0,01	0,00	2,94	0,35	0,00	4,89	4,13	0,01	0,57	1,0	0,6	0,03	0,10
55CD	0,00	13,60	0,00	0,00	1,45	5,60	0,00	45,35	0,60	0,10	18,15	92,7	1,5	0,00	0,11
55CD	0,02	8,15	0,00	0,00	1,48	4,91	0,01	13,54	0,71	0,08	0,9	41,1	0,7	0,00	0,09
55CD	0,02	5,38	0,00	0,00	1,50	2,72	0,00	11,35	0,76	0,05	0,66	35,7	0,1	0,01	0,09
55CD	0,04	1,79	0,00	0,00	1,47	0,67	0,00	11,54	0,99	0,01	0,57	22,4	0,1	0,02	0,09

Tabulka 10.6: Výsledky chemických analýz z lokality Helper.

	Al 396,152 nm ppm	Ca rad 317,933 nm ppm	Fe 259,940 nm ppm	Cu 327,395 nm ppm	K rad 766,491 nm ppm	Mg rad 279,553 nm ppm	Mn 257,610 nm ppm	Na rad 589,592 nm ppm	Si 212,412 nm ppm	Sr 407,771 nm ppm	ppm SO ₄ vypocteno ze S z ICP EOS	ppm Cl	ppm NO ₃	P 213,618 nm ppm	ammonium
blank	0,01	0,12	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,08	0,00	0,00	0,45	0,60	0,13	0,05	0,11
K1V	0,06	8,60	0,00	0,00	0,48	1,65	0,00	0,76	1,56	0,02	9,57	1,24	0,39	0,03	0,11
K1D1	0,10	387,40	0,00	0,00	0,60	7,40	0,00	0,00	0,70	0,30	954,30	4,06	1,05	0,00	0,10
K3D	0,00	43,90	0,00	0,00	1,85	36,15	0,00	3,05	0,05	0,10	252,15	1,25	0,13	0,00	0,11
K3D	0,00	56,85	0,00	0,00	1,45	18,65	0,00	1,10	0,75	0,05	210,15	1,00	0,29	0,00	0,09
K3D	0,04	22,73	0,00	0,00	1,13	2,72	0,00	0,19	1,02	0,01	50,40	0,67	0,13	0,02	0,10
K3D	0,05	25,15	0,00	0,00	1,20	2,59	0,01	0,18	0,76	0,01	53,37	0,71	0,13	0,02	0,09
K3V	0,05	26,90	0,00	0,00	1,10	27,10	0,05	3,10	0,20	0,05	151,65	5,69	2,82	0,00	0,09
K3V	0,03	23,18	0,00	0,00	1,07	6,65	0,01	1,18	0,90	0,02	62,76	2,96	1,21	0,02	0,10
K3V	0,04	25,28	0,00	0,00	1,18	5,81	0,01	1,01	0,84	0,02	64,77	2,16	0,69	0,02	0,10
K5D1	0,00	52,80	0,00	0,00	1,60	12,25	0,00	14,70	0,90	0,10	161,55	30,13	6,81	0,00	0,09
K5D2	0,00	14,70	0,00	0,00	1,40	26,15	0,00	9,50	0,60	0,05	131,25	13,91	5,68	0,00	0,09
K5V	0,07	3,16	0,02	0,00	0,49	1,47	0,00	0,14	1,02	0,01	0,66	0,75	0,13	0,02	0,09
K7D	0,00	71,50	0,00	0,00	2,40	17,00	0,00	12,20	0,90	0,10	195,30	23,24	20,47	0,00	0,12
K7V	0,08	6,20	0,01	0,00	0,37	0,60	0,00	0,15	0,69	0,01	3,03	0,71	0,18	0,02	0,09